

ТРАНСПОРТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УРАЛА

**АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ
С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА**

**СТРАТЕГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ
РОССИЙСКИХ АВИАТРАНСПОРТНЫХ КОМПАНИЙ**



**ПРИМЕНЕНИЕ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ
ТЕПЛОВОГО БЕСКОНТАКТНОГО
КОНТРОЛЯ БУКС В ПОЕЗДАХ**

**МОДЕЛИ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ
В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ**



ПРАВИЛА НАПИСАНИЯ СТАТЕЙ

1. В редакцию направляется текст статьи с информацией об авторах, шифром УДК, двуязычной аннотацией с выделенными ключевыми словами, списком литературы, графиками, рисунками и таблицами. К тексту прилагается сопроводительное письмо, авторский договор и рецензия, заверенная у секретаря ученого совета. В редакцию необходимо прислать распечатку статьи в двух экземплярах (один из экземпляров подписывается всеми авторами, содержит их полные фамилии, имена и отчества, места работы и должности, научные звания, почтовые и электронные адреса и контактные телефоны) и электронный вариант на CD или по электронной почте.

2. Текст статьи объемом не более 12 — 14 страниц предоставляется в формате Microsoft Word'2000-2007, RTF (другие форматы допустимы при согласовании). Размер страницы A4, шрифт из группы Times, кегль 14 pt, полуторный интервал. Все поля по 2 см.

3. Рисунки предоставляются в электронном виде в форматах TIFF, PNG, JPEG. Разрешение растровых рисунков должно быть не менее 100 пикселей на сантиметр (250 на дюйм). Внедренная в текстовый документ графика не всегда воспроизводима в исходном виде. Редакция не несет ответственности за возможные искажения информации, предоставленной только в электронном виде.

4. Таблицы располагаются непосредственно после абзаца, содержащего упоминание о данной таблице. Все таблицы в тексте необходимо пронумеровать, озаглавить. Кегль внутри таблиц — 11, расположение текста — по ширине, расстановка переносов обязательна, междустрочный интервал одинарный.

5. Каждое наименование в списке литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-84 «Библиографическое описание документа» и должно содержать фамилию автора (инициалы указываются после фамилии), название произведения, место издания (город и издательство), год издания, том, выпуск и страницы. Список должен содержать не более 10 источников. Ссылки на источники даются в квадратных скобках, в соответствии с нумерацией в списке литературы.

6. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

1. The text of the article with information about authors, UDC code, bilingual annotation with indicated key words, list of Literature, graphs, figures and tables is sent to the Editorial Office. The text should come with Cover letter, author's contract and review, attested by the Scientific Board Secretary. It is necessary to send to the Editorial Office the printed version of the paper in duplicate (one of the copies is signed by all the authors, contains full information about them, such as: surnames, first and patronymic names, place of work and positions, academic ranks, post and e-mail addresses and contact telephone numbers) and the electronic version on CD or via e-mail.

2. Text of the article should be up to 12-14 pages in Microsoft Word'2000 up to 2007 or Rich Text Format (other formats can be admitted by agreement). Page size A4 formatting, 14-point Times font, 1.5 line spacing. 2 cm margins should be used on all sides.

3. Figures should be presented in electronic version in TIFF, PNG, JPEG formatting. Raster drawings resolution should be 100 pixels per 1 cm (250 pixels per 1 inch) at least. Graphics included into the text document isn't always reproduced in the unmodified state. The Editorial Office isn't responsible for possible information distortion, if presented electronic version only.

4. The table should be placed straight after the paragraph, in which it is mentioned. All the tables should be numbered and titled. Font to be used inside the tables should be 11-point font, the text should be centered, with compulsory hyphenation, single line spacing.

5. Each name in the list of Literature should be composed according to the requirements of State Standard 7.1-84 'Bibliographical description of a document' and contain the author's surname (initials should be put after the surname), paper title, place of publication (city and Publishing House), year of publication, volume, issue and pages. The list of the literature should contain not more than 10. References should be indicated in square brackets, according to the numbers in the list of literature.

6. Fee for papers' publication is not charged from PhD students.

TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URAL

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, член-кор. РАН, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, доктор экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия
6. Валерий Доманский, д-р техн. наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Асадченко Виталий Романович, 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, Челябинск
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 «Ural Transport», Ekaterinburg, Russia
2. Aleksander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, corresponding member of Russian Academy of Sciences, 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. Valery Domansky, DSc, professor of National technical University «Kharkiv politechnical institute», Kharkiv, Ukraine

EDITORIAL BOARD

1. Asadchenko Vitaly Romanovich, DSc, professor, scientific editor, Ekaterinburg
2. Aleksandr Mikhailovich Borovskikh, PhD, Professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsyk Valery Ivanovich, DSc, professor, Rostov
5. Kozlov Petr Alekseevich, DSc, professor, Moscow
6. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
7. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
8. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Chelyabinsk
9. Ledyayev Alexandr Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
10. Reznik Leonid Grigorievich, DSc, professor, Tumen
11. Rumyantsev Sergey Alekseevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhailovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Smolyaninov Alexandr Vasilievich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Umnyashkin Vladimir Alekseevich, DSc, professor, Izhevsk
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

Самуйлов В.М., Фирстов С.В., Правдин С.С. / Анализ взаимодействия потоков с целью увеличения эффективности производства.....	3
Кошкарлов В.Е., Самуйлов В.М., Кошкарлов Е.В. / Организация внедрения технологических инноваций в дорожном хозяйстве Свердловской области.....	7
Самуйлов В.М., Кошкарлов В.Е. / Развитие инновационной деятельности в региональном автодорожном хозяйстве (на примере Свердловской области).....	11
Глемба К.В., Ларин О.Н. / Обзор методов определения надежности оператора в динамических эргатических системах.....	17
Кузнецова Е.Ю. / Стратегии обеспечения конкурентоспособности российских авиатранспортных компаний.....	23

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА, СВЯЗЬ

Разгонов А.Е., Сергеев Б.С., Яшук Е.И. / Защита рельсовых цепей путем применения параметрического трансформатора.....	28
Беляков И.В. / Оценка количества информации по Фишеру от коэффициента антимодальности квазидетерминированных помех рельсовых линий.....	33
Бирюков А.П. / Нормирование длин заземляющих проводников в микропроцессорных централизациях стрелок и светофоров.....	35

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

Смолянинов А.В., Пранов В.А. / Повышение точности оценки ресурса боковой рамы тележки грузового вагона по результатам усталостных стендовых испытаний.....	39
Добычин И.А., Градинаров М.Ю., Трошков В.В. / Задачи формирования рессорных комплектов тележек грузовых вагонов путем подбора пружин по силовым и геометрическим параметрам.....	43
Добычин И.А., Градинаров М.Ю., Трошков В.В. / Методика подбора пружин в рессорные комплекты тележки грузового вагона, основанная на динамических критериях качества.....	50
Долгих К.О., Лапшин В.Ф. / Идентификация параметров математической модели вибронагруженности кузова полувагона.....	56
Миронов А.А., Павлюков А.Е., Салтыков Д.Н. / Применение математического моделирования для решения практических задач теплового бесконтактного контроля боксов в поездах.....	61
Бачурин Н.С., Красниченко А.А., Шавырин Д.Ю. / Теоретические и экспериментальные исследования динамики трамвайного вагона.....	67
Бачурин Н.С., Ляшенко С.Е. / Разработка модели процесса упрочнения литых деталей вагонов методом упругопластической деформации.....	71

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА. ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Самотяев А.А., Петров М.Б., Дорошенко Ю.А. / Системная оценка эффективности транспортных перевозок на свердловской железной дороге.....	75
Ковалев Р.Н., Лаврищев С.А. / Рационализация процесса технического осмотра подвижного состава автомобильного транспорта.....	82
Плахотич С.А. / Обеспечение пропуска грузовых поездов различной категории по массе и длине на основе использования предузловых станций преобразования.....	85
Покровская О.Д. / Определение параметров терминальной сети региона (на примере Кемеровской области).....	93
Тимухина Е.Н. / Повышение функциональной надежности станций за счет финитного управления процессами.....	98
Нечаева М.Н. / Новые способы перевозки легковых автомобилей в контейнерах (с использованием дополнительного оборудования Car rack и Trans-rak).....	102
Брусанин Д.А., Казаков А.Л., Маслов А.М. / Оптимизация региональной маршрутной сети междугородных и пригородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов.....	106

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

Цихалевский И.С., Кудайаров М.М. / Оптимизация организации ремонта локомотивов на полигоне свердловской железной дороги.....	110
Кучумов В.А., Мурзин Р.В., Охотников Н.С., Кудрявцев Я.Б. / Экспериментальное определение коэффициента сцепления колес электровоза 2ЭС10 с рельсами.....	114
Асадченко В.Р. / Разработка математической модели тормозных систем скоростного подвижного состава с противоюзными регуляторами скольжения.....	119

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Аккерман Г.Л., Аккерман С.Г. / Транспортная сеть и непознанность среды.....	125
Басовский Д.А. / О возможности взаимозаменяемости стрелочных переводов дорог необщего пользования.....	131

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Аржанников Б.А. / Система управляемого тягового электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных и тяжеловесных поездов.....	134
Костромин А.М., Евдокимова О.Г. / Модели заземляющих устройств в системах обеспечения движения поездов.....	138
Раевский Н.В., Дурнов В.Г. / Выбор оптимальной методики прогнозирования временных рядов электропотребления при краткосрочном периоде предупреждения.....	143

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Яковлев П.В., Драгунов Г.Д. / Математическое моделирование трансмиссии автомобиля «Урал» с новой раздаточной коробкой.....	148
--	-----

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

Samuilov V.M., Firsov S.V., Pravdin S.S. / Analysis of flows interaction in order to increase productive efficiency.....	3
Koshkarov V.E., Samuilov V.M., Koshkarov E.V. / Organization of technological innovations' implementation in road sector of Sverdlovsk region.....	7
Samuilov V.M., Koshkarov V.E. / Innovation activity development in regional road sector (by the example of Sverdlovsk region).....	11
Glemba K.V., Larin O.N. / Review of methods for determining the operator reliability in dynamic ergatic systems.....	17
Kuznetsova E.Yu. / Strategies to provide the competitiveness of russian air-transport companies.....	23

AUTOMATICS, TELEMCHANICS, COMMUNICATION

Razgonov A.P., Sergeev B.S., Yashchuk E.I. / Protection of track circuits by application of parametric transformer.....	28
Belyakov I.V. / Estimate of Fisher information amount on the antimodality coefficient of quasideterministic disturbances of railway lines.....	33
Biryukov A.P. / Norms of grounding conductors' lengths in microprocessor interlocked switch and traffic lights.....	35

RAILWAY CARS AND FACILITIES

Smolyaninov A.V., Pranov V.A. / Improvement of estimation accuracy of side frames resource of freight car's bogie according to results of fatigue bench tests.....	39
Dobychin V.A., Gradinarov M.Yu., Troshkov V.V. / Forming of spring groups of freight cars' bogies by springs' choice according to power and geometric parameters.....	43
Dobychin V.A., Gradinarov M.Yu., Troshkov V.V. / Method of springs' selection into freight bogie spring group, based on dynamic quality criteria.....	50
Dolgykh K.O., Lapshin V.F. / Identification of mathematical model parameters of an open car body vibroloading.....	56
Mironov A.A., Pavlyukov A.E., Saltykov D.N. / Application of mathematical simulation for decision of practical tasks of thermal noncontact control of boxes in trains.....	61
Bachurin N.S., Krasnichenko A.A., Shavyrin D.Yu. / Theoretical and experimental research of tram car dynamics.....	67
Bachurin N.S., Lyashenko S.E. / Development of a model of cars molded pieces' hardening process by the method of elasto-plastic deformation.....	71

THE ORGANIZATION OF THE TRANSPORTATION PROCESS. PASSENGER TRANSPORT

Samotayev A.A., Petrov M.B., Doroshenko Yu.A. / Statistical analysis of freight departure and arrival on sverdlovsk railway.....	75
Kovalev S.N., Lavrishchev S.A. / Optimisation of technical inspection process of motor transport rolling stock.....	82
Plakhotich S.A. / Handling of freight trains of different masses and lengths on the basis of prehub modification stations' use.....	85
Pokrovskaya O.D. / Definition of parameters of a region's terminal network (by the example of Kemerovo region).....	93
Timukhina E.N. / Stations' functional reliability improvement based on finite processes management.....	98
Nechaeva M.N. / New methods of passenger cars' transportation in containers (using additional equipment: Car rack and Trans-rak).....	102
Brusyanin D.A., Kazakov A.L., Maslov A.M. / Optimization of regional route network of intercity and commuter traffic with the use of logistic principles.....	106

ROLLING STOCK AND TRACTION

Tsikhalevskiy I.M., Kudayarov M.M. / Optimization of locomotives' repair process organization on the proving ground of sverdlovsk railway.....	110
Kuchumov V.A., Murzin R.V., Okhotnikov N.S., Kudryavtsev Ya.B. / Experimental identifying traction coefficient of 2ES10 electric locomotive's wheels with rails.....	114
Asadchenko V.R. / Development of mathematical model of braking system of high-speed rolling stock with antiskid slip regulators.....	119

CONSTRUCTION AND OPERATION OF RAILWAYS

Akkerman G.L., Akkerman S.G. / Transport network and environment non-detection.....	125
Basovsky D.A. / Potential interchangeability of turnouts for railways not of general use.....	131

ELECTRIC SUPPLY

Arzhannikov B.A. / The system of controlled traction power supply of direct current for high-speed and heavy trains' handling.....	134
Kostrominov A.M., Evdokimova O.G. / Models Of Grounding Devices In Automatic Train Control.....	138
Raevsky N.V., Durnov V.G. / Choice of optimal method on forecasting times series electricity consumption by short-term anticipated period.....	143

AUTOMOBILE TRANSPORT

Yakovlev P.V., Dragunov G.D. / Mathematical modeling of transmission of 'Ural' car with a new transfer case.....	148
--	-----

УДК 519.876.2:656.07

Валерий Михайлович Самуйлов, академик Российской академии транспорта, доктор технических наук, профессор кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Сергей Валерьевич Фирстов, главный инженер Екатеринбургского ИВЦ, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Сергей Сергеевич Правдин, инженер технического отдела Екатеринбургского ИВЦ, студент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

Valeriy M. Samuilov, Academician of Russian Academy of Transport, DSc, Professor of 'World economics and logistics' chair of the Ural State University of Railway Transport (USURT).

Sergey V. Firstov, chief engineer of Ekaterinburg Data-Computing Center, PhD, Associate Professor of 'World economics and logistics' chair of the Ural State University of Railway Transport (USURT).

Sergey S. Pravdin, engineer of technical division of Ekaterinburg Data-Computing Center, student of 'World economics and logistics' chair of the Ural State University of Railway Transport (USURT)

Analysis Of Flows Interaction In Order To Increase Productive Efficiency

Аннотация

Рассмотрены зависимости информационных, материальных и финансовых потоков, которые отражают как работу системы в целом, так и отдельные требования потребителей. На основе метода вычисления корреляции показана возможность оптимизации взаимодействия потоков при выполнении основных логистических операций. Проведена интерпретация статистических и математических результатов на язык экономики.

На основе исследований, рассмотренных в статье, дана оценка связей между различными потоками, принимающими участие в логистических процессах. Приведены итоги анализа, в котором определена зависимость всех потоков друг от друга, и выявлены закономерности их взаимодействия.

Ключевые слова: корреляционный анализ бизнес-процессов, взаимодействие и зависимость потоков

Annotation

The article studies the dependence of information, material and financial flows, which reflect both the functioning of a system in whole and individual customers' requirements. On the basis of correlation calculation, it is shown the possibility of optimization of flows' interaction when fulfilling the main logistic operations. The statistic and mathematical results are interpreted into economics language.

On the basis of research considered in this article the interaction of different flows, taking part in logistic processes, have been estimated. The article examines the results of the analysis, in which the dependence of all the flows from each other is identified and the regularities of their interaction are shown up.

Key words: correlation analysis of business processes, flows' interaction and dependence.

Анализ информационных, финансовых и материальных потоков производится с целью определения свойств потоков и системы в целом для построения модели взаимодействия потоков. Выбор пути принятия решения в производственной деятельности, изменения того или иного процесса должен непосредственно зависеть от изучения поведения зависимостей всех этих потоков с течением времени. Системы транспортного обслуживания в основном характеризуются изменяющимся потоком заявок на услуги, возможностью управления процессами их поступления и исполнения, введения различных ограничений на обслуживание заявок, последовательностью выполнения, наличием обратных связей, адаптацией, развитием во времени и другими логистическими свойствами.

Современные производственные процессы имеют высокую вариабельность и требуют непрерывного контроля. Они рассматриваются как объект управления и характеризуются следующими свойствами:

- сложностью иерархической структуры с множеством неоднородных элементов и связей;
- динамичностью процессов, имеющих стохастический характер;
- единством организационным, технологическим, экономическим, информационным и т. д.

У. Шухарт [1] дал следующее определение вариабельности процессов: «Вариабельность — обобщенная характеристика всех видов отклонений параметров и характеристик процессов от значений, обеспечивающих достижение системного оптимума». Вариабельность препятствует идеальному согласованию потоковых процессов, она является универсальным и всеобщим свойством всех процессов. Способ увеличения эффективности любой производственной системы — уменьшение вариабельности всех процессов управления.

В качестве примера оценим возможность оптимизации взаимодействия основных видов потоков при выполнении

ключевых операций по оформлению отправки контейнера. Воспользуемся методом вычисления корреляций для оценки связей между потоками при выполнении данной операции. В результате анализа получим зависимости всех потоков друг от друга и выявим закономерности их взаимодействия.

При исследовании корреляций (зависимостей, связей) обычно не влияют на переменные, а только измеряют их и хотят найти зависимости между некоторыми измеренными переменными [2].

В экспериментальных исследованиях, напротив, варьируют некоторыми переменными и измеряют воздействия этих изменений на другие переменные. Анализ данных в экспериментальном исследовании также приходит к вычислению зависимостей между переменными, а именно между переменными, на которые воздействуют, и переменными, на которые влияет это воздействие. Тем не менее экспериментальные данные потенциально снабжают нас более качественной информацией. Только экспериментально можно убедительно доказать причинную связь между переменными. Например, если обнаружено, что всякий раз, когда изменяется переменная A , изменяется и переменная B , то можно сделать вывод — переменная A оказывает влияние на переменную B , т. е. между переменными A и B имеется причинная зависимость.

Корреляция представляет собой меру зависимости переменных [2]. Оценка тесноты связи между признаками предполагает определенные меры соответствия вариации результативного признака от одного (при парных зависимостях) или нескольких (множественных) факторов.

Переменные — это то, что можно измерять, контролировать или что можно изменять в исследованиях. Переменные отличаются многими аспектами, особенно той ролью, которую они играют в исследованиях, например шкалой измерения и т. д. Для идеальной модели коэффициент корреляции $|r|=1$, т. е. все потоки взаимосвязаны. Предположим, что рассматриваемые потоки, влияющие на состояние системы, взаимосвязаны некоторой зависимостью $P(I, M, \Phi, t)$, которая определяет корреляцию реальной системы, где $I=(i_1, i_2, \dots, i_n, \dots)$ — множество функций, описывающих информационные потоки; $M=(m_1, m_2, \dots, m_n, \dots)$ — множество функций, описывающих материальные потоки; $\Phi=(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n, \dots)$ — множество функций, описывающих финансовые потоки; t — дискретный промежуток времени.

Кроме того, такие функции могут быть векторами, содержащими переменные.

Таким образом, получаем систему векторов, описывающих входные потоки,

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = f_{i1}[(a_n)_{1,1}, (a_n)_{1,2}, \dots, (a_n)_{1,k1}], \\ \bar{I}_2 = f_{i2}[(a_n)_{2,1}, (a_n)_{2,2}, \dots, (a_n)_{2,k2}], \\ \dots \\ \bar{I}_n = f_{in}[(a_n)_{n,1}, (a_n)_{n,2}, \dots, (a_n)_{n,kn}], \\ \bar{M}_1 = f_{m1}[(a_m)_{1,1}, (a_m)_{1,2}, \dots, (a_m)_{1,k1}], \\ \bar{M}_2 = f_{m2}[(a_m)_{2,1}, (a_m)_{2,2}, \dots, (a_m)_{2,k2}], \\ \dots \\ \bar{M}_n = f_{mn}[(a_m)_{n,1}, (a_m)_{n,2}, \dots, (a_m)_{n,kn}], \\ \bar{\Phi}_1 = f_{\phi1}[(a_\phi)_{1,1}, (a_\phi)_{1,2}, \dots, (a_\phi)_{1,k1}], \\ \bar{\Phi}_2 = f_{\phi2}[(a_\phi)_{2,1}, (a_\phi)_{2,2}, \dots, (a_\phi)_{2,k2}], \\ \dots \\ \bar{\Phi}_n = f_{\phi n}[(a_\phi)_{n,1}, (a_\phi)_{n,2}, \dots, (a_\phi)_{n,kn}]. \end{cases}$$

Существует множество информационных, материальных и финансовых потоков, которые отражают как работу системы в целом, так и требования потребителей. Каждый поток может характеризоваться элементами информационных потоков. Например, если взять информационный поток «Информация о процедурах заказов», то его элементами будут:

- требования наличия грузовой перевозки (ГП) в определенных пунктах дислокации;
- величина заказа потребителей и спецификации грузов;
- минимальная величина заказа и ассортимента;
- процедура сбора заказов;
- коммуникационные каналы для сбора заказов;
- процедура возврата заказов и т. д.

Рассмотрим входные потоки, которые описывают процесс приемки груза к перевозке в контейнере. Пусть все действия происходят в дискретный период времени $(t_1, \dots, t_n) = t$. В результате анализа получим следующую систему:

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = f_{i1}(I_{1t_1}, I_{1t_2}, \dots, I_{1t_n}), \\ \bar{I}_2 = f_{i2}(I_{2t_1}, I_{2t_2}, \dots, I_{2t_n}), \\ \bar{I}_3 = f_{i3}(I_{3t_1}, I_{3t_2}, \dots, I_{3t_n}), \\ \bar{M}_1 = f_{m1}(M_{1t_1}, M_{1t_2}, \dots, M_{1t_n}), \\ \bar{M}_2 = f_{m2}(M_{2t_1}, M_{2t_2}, \dots, M_{2t_n}), \\ \bar{\Phi}_1 = f_{\phi1}(\Phi_{1t_1}, \Phi_{1t_2}, \dots, \Phi_{1t_n}). \end{cases}$$

где i_1 — количество поступивших заявок; i_2 — количество заявок, получивших отказ; i_3 — количество заявок, ушедших на ожидание; m_1 — состояние контейнеров (количество негодных под погрузку); m_2 — наличие контейнеров на станции; ϕ_1 — количество оплаченных заявок.

Для измерения тесноты связи при множественной корреляционной зависимости, т. е. при исследовании трех и более признаков одновременно, вычисляется множественный коэффициент корреляции. Множественный коэффициент корреляции рассчитывается при наличии линейной связи между результативным и несколькими факторными признаками, а также между каждой парой факторных признаков. Примем в качестве результативного фактора выполнение заявок на отправку контейнеров, а сопутствующими факторами — материальные и финансовые потоки. В случае оценки связи между результативным и двумя факторными признаками совокупный коэффициент корреляции можно определить по формуле

$$R_{n/np} = \sqrt{\frac{r_{ni}^2 + r_{n\phi}^2 - 2r_{ni} \cdot r_{n\phi} \cdot r_{i\phi}}{1 - r_{i\phi}^2}},$$

где r — парные коэффициенты корреляции между признаками.

Применим изображенную на рис. 1 схему корреляционного анализа бизнес-процессов.

Статистические данные рассматриваемых потоков по 20-футовым контейнерам с апреля 2006 г. по апрель 2007 г. по контейнерному отделению станции Свердловск-Товарный приведены в табл. 1.

Для рассматриваемого случая совокупность парных коэффициентов корреляции будет выглядеть так:



Рисунок 1 — Схема корреляционного анализа процесса

Таблица 1 — Статистические данные по заявкам на перевозку грузов 20-футовыми контейнерами за исследуемый период

Месяц	и ₁	и ₂	и ₃	м ₁	м ₂	ф ₁
Апрель	1284	25	40	80	1243	1286
Май	1270	20	42	79	1238	1273
Июнь	1293	18	35	65	1235	1296
Июль	1292	26	31	70	1240	1292
Август	1301	22	43	80	1256	1308
Сентябрь	1290	21	30	84	1253	1291
Октябрь	1283	20	33	75	1240	1286
Ноябрь	1265	24	39	79	1251	1266
Декабрь	1263	17	41	78	1248	1261
Январь	1280	13	40	80	1245	1284
Февраль	1259	30	38	77	1241	1261
Март	1288	26	35	88	1260	1293
Апрель	1297	21	38	86	1255	1299

$$r_{im} = \frac{\overline{им} - \overline{и} \cdot \overline{м}}{\sigma_{и} \sigma_{м}}$$

$$r_{иф} = \frac{\overline{иф} - \overline{и} \cdot \overline{ф}}{\sigma_{и} \sigma_{ф}}$$

$$r_{mf} = \frac{\overline{мф} - \overline{м} \cdot \overline{ф}}{\sigma_{м} \sigma_{ф}}$$

$\sigma_{и}^2$ — дисперсия фактических значений результативного признака,

$$\sigma_{и}^2 = \overline{и^2} - (\overline{и})^2,$$

$$\sigma_{и}^2 = 1495598,385 - (1222,846)^2 = 246,045284$$

Таблица 2 — Расчетные данные для определения коэффициента корреляции

Месяц	и	м	ф	и м	м ф	и ф	и ²	м ²	ф ²
Апрель	1219	1163	1286	1417697	1495618	1567634	1485961	1352569	1653796
Май	1203	1159	1273	1400072	1475407	1537784	1459264	1343281	1620529
Июнь	1240	1170	1296	1450800	1516320	1607040	1537600	1368900	1679616
Июль	1235	1170	1292	1444950	1511640	1595620	1525225	1368900	1669264
Август	1236	1176	1308	1453536	1538208	1616688	1527696	1382976	1710864
Сентябрь	1239	1169	1291	1448391	1509179	1599549	1535121	1366561	1666681
Октябрь	1230	1165	1286	1432950	1498190	1581780	1512900	1357225	1653796
Ноябрь	1202	1172	1266	1408744	1451752	1521732	1444504	1373584	1602756
Декабрь	1205	1170	1261	1409850	1475370	1519505	1452025	1368900	1590321
Январь	1227	1165	1284	1429455	1495860	1575468	1505529	1357225	1648656
Февраль	1191	1164	1261	1386324	1467804	1501851	1418481	1354896	1590121
Март	1227	1172	1293	1438044	1515396	1536511	1505529	1373584	1671849
Апрель	1238	1169	1299	1447222	1518531	1608162	1532644	1366561	1687401
Сумма	15897	15184	16696	18568035	19501275	20419324	19442779	17735162	21445450
Средняя	1222,846	1168	1284,308	1428310,385	1500098,077	1570717,231	1495598,385	1364243,231	1649650

$\sigma_{м}^2, \sigma_{ф}^2$ — дисперсии фактических значений факторных признаков,

$$\sigma_{м}^2 = \overline{м^2} - (\overline{м})^2,$$

$$\sigma_{м}^2 = 1364243,231 - (1168)^2 = 19,231.$$

$$\sigma_{ф}^2 = \overline{ф^2} - (\overline{ф})^2,$$

$$\sigma_{ф}^2 = 1649650 - (1284,308)^2 = 202,961136.$$

Данные для вычисления коэффициента корреляции приведены в табл. 2.

Парные коэффициенты корреляции:

$$r_{im} = \frac{1428310,385 - 1222,846 \cdot 1168}{\sqrt{246,045 \cdot 19,231}} = 0,38,$$

$$r_{иф} = \frac{1570717,231 - 1222,846 \cdot 1284,308}{\sqrt{246,045 \cdot 202,961}} = 0,923,$$

$$r_{mf} = \frac{11500098,077 - 1168 \cdot 1284,308}{\sqrt{19,231 \cdot 202,961}} = 0,421.$$

Совокупный коэффициент корреляции:

$$R_{имф} = \sqrt{\frac{r_{им}^2 + r_{иф}^2 - 2r_{им} \cdot r_{иф} \cdot r_{mf}}{1 - r_{mf}^2}},$$

$$R_{имф} = \sqrt{\frac{0,38^2 + 0,923^2 - 2 \cdot 0,38 \cdot 0,923 \cdot 0,421}{1 - 0,421^2}} = \sqrt{0,85} = 0,922$$

Приближение $R_{имф}$ к единице свидетельствует о сильной зависимости между признаками. Проверку адекватности всей модели осуществим на основе F-критерия Фишера — Снедекора:

$$F_p = \frac{\frac{1}{2} R_{имф}^2}{\frac{1}{n-3} (1 - R_{имф}^2)},$$

$$F_p = \frac{\frac{1}{2} 0,922^2}{\frac{1}{13-3} (1 - 0,922^2)} = 28,34.$$

Гипотеза о незначимости коэффициента множественной корреляции отвергается, так как если $F_{кр} = 4,1$ из таблицы распределения для $\alpha = 0,05$; $v_1 = 2$; $v_2 = n - 3$, где $n = 13$ — число наблюдаемых месяцев, то $[F_p = 28,34] > [F_{кр} = 4,1]$.

Наиболее сложным этапом корреляционного анализа является интерпретация полученного результата, т. е. перевод его с

языка статистики и математики на язык экономики. Всякая интерпретация начинается со статистической оценки значимости входящих в модель факторных признаков, т. е. с выяснения, как они влияют на величину результирующего признака. Особое значение имеет знак факторного признака, он говорит о характере влияния на результирующий признак. Если факторный признак имеет знак плюс, то с увеличением данного фактора результирующий признак возрастает; если факторный признак со знаком минус, то с его увеличением результирующий признак уменьшается.

При анализе совокупного влияния факторов при наличии взаимосвязей между ними характер их влияния может меняться. Если экономические выводы подсказывают, что факторный признак должен иметь положительное значение, а он со знаком минус, то необходимо проверить проделанные расчеты.

Вывод: так как факторные признаки имели знак плюс, то с увеличением данных факторов результирующий признак будет возрастать, следовательно, они будут иметь положительное влияние на эффективность производства.

Логика расчета данного примера можно просмотреть на рис. 2, где представлена схема, на которой стрелки показывают потоки данных, а работы — поэтапный алгоритм расчета сводного коэффициента корреляции, характеризующего зависимости материального, финансового и информационного потоков, возникающие при подаче заявок на перевозку груза в контейнерах.

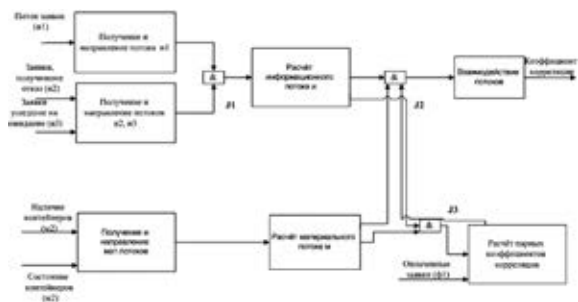


Рисунок 2 — Схема выполнения работ по оценке зависимости потоков

Зависимость взаимодействия потоков $P(I, M, F, t)$, выраженная через сводный коэффициент корреляции $R_{\Sigma} = 0,922 \rightarrow 1$, говорит о том, что информационные, материальные и финансовые потоки связаны между собой, а также что каждый поток влияет на состояние других потоков. Это позволяет увеличить эффективность производственной системы за счет уменьше-

ния варибельности всех процессов управления. Например, при сокращении времени осмотра контейнера повышается вероятность того, что заявка будет удовлетворена намного быстрее. Отсюда можно сделать вывод: если сводный коэффициент корреляции между потоками будет стремиться к единице, то выполняемая работа будет наиболее эффективна.

В настоящее время существует достаточно много методов описания моделей логистических систем. Эти методы складывались постепенно в рамках систем транспортного обслуживания. На первом этапе модели носили целостный характер и прошли определенные стадии развития, связанные с увеличением чисто технических характеристик, обосновывающих эффективность принятых решений, затем технико-экономических и только потом — экономических. На сегодняшний день целостный (логистический) подход в применении расчетов транспортных систем достаточно распространен. Имеется целый ряд работ, посвященных решению практической стороны вопроса технико-технологической подготовки комплексов на основе применения процедуры математического моделирования, получивший название метода Монте-Карло (статистических испытаний) [3]. Наиболее известны формальные модели — математические формулы, независимо от их представления в виде функциональных связей или систем различного рода уравнений. Это могут быть модели линейного и нелинейного программирования, которые можно описать системами линейных и нелинейных уравнений. Также в теории массового обслуживания можно выделить и статистические модели. Их основные недостатки связаны с тем, что они дают представление о системе в целом только на уровне явлений.

Современный уровень применяемого математического инструментария пока не позволяет предвидеть качественные изменения в технике и технологии работы транспортных комплексов и оценить их. Основная причина невысокой эффективности получаемых решений по структурно-функциональной оптимизации транспортных комплексов на базе существующих математических методов — их отрыв от теории организации, которая является определяющей в логистике.

Подводя итоги, можно сказать, что в производственном процессе информационные, материальные и финансовые потоки связаны между собой и имеют определенное влияние друг на друга. Проведя анализ и определив коэффициент корреляции, стоит отметить, что если его значение стремится к единице, то количество вариантов принимаемых решений сокращается, тем самым повышается эффективность выполняемой работы.

Литература

1. Shewhart W. *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control*. N.Y.: Dover Publ., Inc., 1939 (reprint 1986). 163 p.
2. Самуйлов В.М., Фирстов С.В., Черных В.В. Информационная логистика : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. 155 с.
3. Шикин Е.В., Чхартишвили А.Г. Математические методы и модели в управлении : учеб. пособие. М. : Дело, 2000. 440 с.

References

1. Shewhart W. *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control*. N.Y.: Dover Publ., Inc., 1939 (reprint 1986). 163 p.
2. Samujlov V.M., Firstov S.V., Chernykh V.V. *Informatsionnaja logistika [Information logistics]: uchebnoe posobie*, - Ekaterinburg: izdatel'stvo UrGUPS – 2011 - 155s.
3. Shikin E.V., Chhartishvili A.G. *Matematicheskie metody i modeli v upravlenii [Mathematical methods and models in management]: uchebnoe posobie*. – M.: Delo, 2000 – 440s.

УДК 658.3:656.2

Владимир Евгеньевич Кошкарлов, аспирант кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Валерий Михайлович Самуилов, академик Российской академии транспорта, доктор технических наук, профессор кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Евгений Васильевич Кошкарлов, доктор экономических наук, старший научный сотрудник УралгипродорНИИ, Екатеринбург

ОРГАНИЗАЦИЯ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ В ДОРОЖНОМ ХОЗЯЙСТВЕ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Vladimir E. Koshkarov, post-graduate student of 'Transport economics' chair, the Ural State University of Railway Transport
Valeriy M. Samuilov, DSc, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, USURT
Evgeniy V. Koshkarov, DSc, Senior scientific associate, Ural GIPRODORNI

Organization Of Technological Innovations' Implementation In Road Sector Of Sverdlovsk Region

Аннотация

Рассмотрена система организации производства на основе внедрения технологических инноваций в дорожном хозяйстве Свердловской области. Предложены универсальные алгоритмы внедрения инноваций, содержащие блоки создания прототипов инноваций; организации прикладных НИОКР и проектных работ по опытному внедрению (получению опытных партий, строительству опытных участков, отработке технологий на производственных базах); сертификации качества инновационной продукции; коммерциализации объектов промышленной собственности.

Определен перечень необходимых условий и предложен пакет документов технического регулирования, разработка которых позволит включить инновационную технологию, конструкцию или материал в проектную документацию на строительство, реконструкцию или ремонт автомобильных дорог регионального значения.

Предложена авторская методика оценки эффективности инновационной продукции (дорожной технологии или материала) на основе изучения жизненного цикла строящегося и эксплуатируемого объекта дорожного хозяйства (проектируемой автодороги, искусственного сооружения).

Ключевые слова: дорожное хозяйство, проект, автомобильная дорога, технологические инновации, стадии НИОКР, сертификация, стандарт организации, экономическая эффективность.

Annotation

In the article it is examined the system of industrial engineering based on technological innovations implementation in road sector of Sverdlovsk region. They are suggested the universal algorithms of innovations' implementation, which contain the following sets: organization of applied R&D and design works on experimental implementation (getting pilot runs, building experimental sections, adjusting technologies on production plants), certification of innovation products' quality, commercialization of industrial property objects.

The list of necessary conditions is specified and they are offered technical regulation documents, which development will allow to include innovation technology, structure or material into design documents on construction, reconstruction or repair works of local highways.

The authors suggest their own method of efficiency estimation of innovation products (of road technology or material) on the basis of life cycle study of a road sector object which is being built or exploited (of a designed highway, artificial structure).

Key words: road sector, project, highway, technological innovations, R&D phases, certification, organization standard, economic efficiency.

Интеграция России в мировую экономическую и транспортную систему [1—3], а также в систему технического регулирования требует гармонизации отечественной системы стандартизации и оценки качества инновационной продукции в сопоставлении с евро нормами (EN), стандартами стран СНГ (при осуществлении Таможенного союза с Казахстаном и Белоруссией) и других стран с развитой транспортной инфраструктурой. Результатом такой интеграции становится система международных транспортных коридоров (МТК), часть которых (автодорожный МТК-2) проходит через Свердловскую область.

Разработка и применение в условиях МТК инновационных технологий, конструкций и материалов на этапах жизненного цикла освоения инновационной продукции, например полимерно-битумных вяжущих (ПБВ), модифицированных асфальтобетонных покрытий, обеспечит в перспективе конкурентные преимущества российской продукции в международных и внутренних транспортных операциях, позволит отечественным дорожным организациям полноценно участвовать в международном разделении труда.

Целью работы была разработка механизма организации внедрения новых технологий и эффективных алгоритмов инновационной деятельности для развития транспортной инфраструктуры, создания документов технического регулирования на региональном уровне управления дорожным хозяйством.

При проведении исследований систем управления на транспорте и в дорожном хозяйстве, создании методов и алгоритмов решения задач управления на первый план выходит выявление противоречий между развитием НТП и качеством фиксированного состояния системы, регламентирование обратных связей, обеспечивающих состояние устойчивости и способности к развитию инновационной транспортной системы [3]. Причем построение интеллектуальной информационной среды в системах транспорта осуществляется не за счет расширения информационной базы, а преимущественно

за счет повышения уровня интеллектуальных систем управления, качества инфраструктурных моделей и информационных технологий [4].

При доведении инновационной разработки до промышленного внедрения требуется структурировать НИОКР по укрупненным стадиям, которых может быть как минимум две: опытно-исследовательская и опытно-промышленная (производственная).

Опытно-исследовательская стадия НИОКР — традиционный этап для технологических инноваций. Часто научно-исследовательская работа заканчивалась именно на данной стадии, а достигнутый научный результат (рекомендации, отчет о НИР) направлялся «в архивы» и в итоге не был доведен до производства.

Опытно-промышленная стадия является логическим продолжением опытно-исследовательской и предполагает комплекс опытно-экспериментальных работ непосредственно на производстве, где планируется внедрение инновации. Оработка новой технологии, в свою очередь, включает проверку параметров новых технологических регламентов и технических требований, запроектированных в документах технического регулирования производства и проектирования (СТО), мониторинг инновационной продукции и опытных участков автодорог и мостов. Перед включением в хозяйственный оборот инновационную продукцию необходимо стандартизировать, сертифицировать с учетом вновь разработанных требований по аналогии с передовым опытом, например стандартами Белоруссии (СТБ), евро нормами.

Принципиальная схема процесса управления и реализации технологических инноваций в дорожном хозяйстве, апробированная на ряде объектов в дорожной отрасли, должна, на наш взгляд, состоять из нескольких ключевых процессов (рис. 1).

Центральный процесс — реализация и внедрение инноваций. Вспомогательные процессы — сертификация качества вновь создаваемой продукции, прототипирование инноваций, информационное и патентное обеспечение, коммерциализация объектов промышленной собственности (ОПС).

НИОКР-ОИС (опытно-исследовательская стадия) и НИОКР-ОПС (опытно-промышленная стадия) формируются и выполняются под непосредственным воздействием проектно-технологической подсистемы, а также подсистемы организации внедрения и оценки качества.

На завершающей стадии внедрения транспортные инновации могут проходить всестороннюю обкатку на специализированных стендах и полигонах, подобных проектируемому полигону высокоскоростных технологий на транспорте в Свердловской области [2], либо на опытных участках, выделяемых на действующей сети автодорог.

Для использования инноваций (новых технологий и материалов) при разработке проектной документации необходимым условием является наличие сертификатов (как минимум — соответствия и гигиенического); технико-экономических обоснований и расчетов ожидаемой (оценочной) экономической эффективности от внедрения инновации в производство, а также специальной нормативно-технической документации:

- стандартов организации (СТО) на инновационную продукцию и конструктивные решения с ее применением при

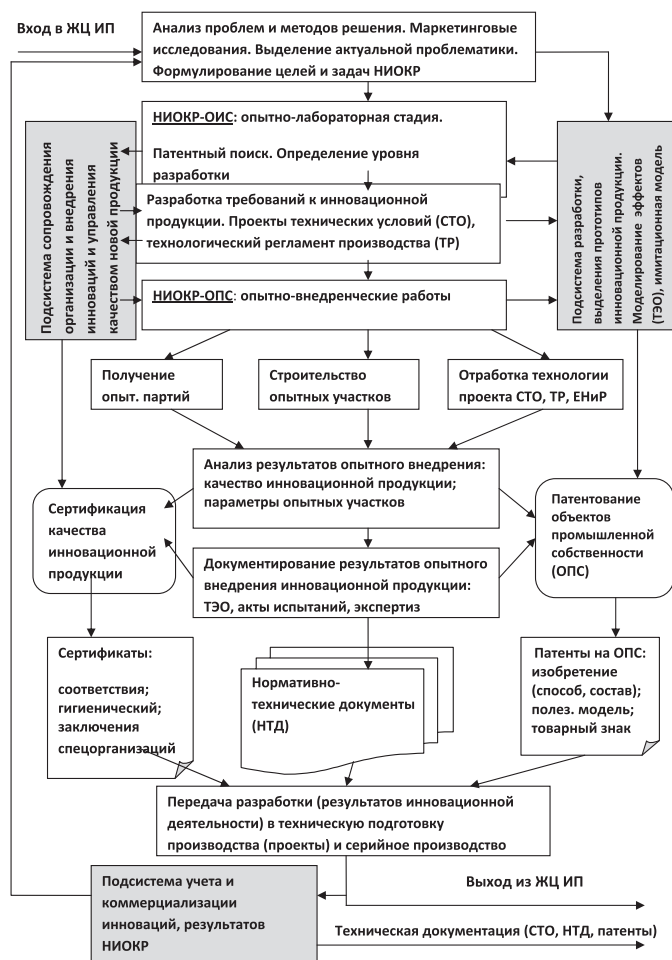


Рисунок 1 — Алгоритм организации внедрения инноваций на этапах НИОКР при внедрении инноваций на транспорте и в региональном дорожном хозяйстве

строительстве (ремонте) автомобильных дорог и искусственных сооружений;

- единичных норм и расценок (ЕНиР), утвержденных региональными органами по ценообразованию, для использования в проектах и автоматизированного расчета сметной стоимости объектов в проектных организациях;
- технологических регламентов (ТР) и научно-технических заключений отраслевых специализированных организаций, испытательных центров для использования при производстве работ.

Блок-схема внедрения инноваций в проектах по опыту Свердловского управления автомобильных дорог и института УралгипродорНИИ, полученному при внедрении технологических инноваций в период 2000-2010 гг., представлена на рис. 2.

Вопросам прогнозной оценки эффективности инноваций уделяется большое внимание в методической литературе. Ранее эти вопросы рассматривались в контексте развития научно-технического прогресса, повышения качества новой продукции и определении эффективности капитальных вложений в отраслях народного хозяйства, промышленности и транспорта.

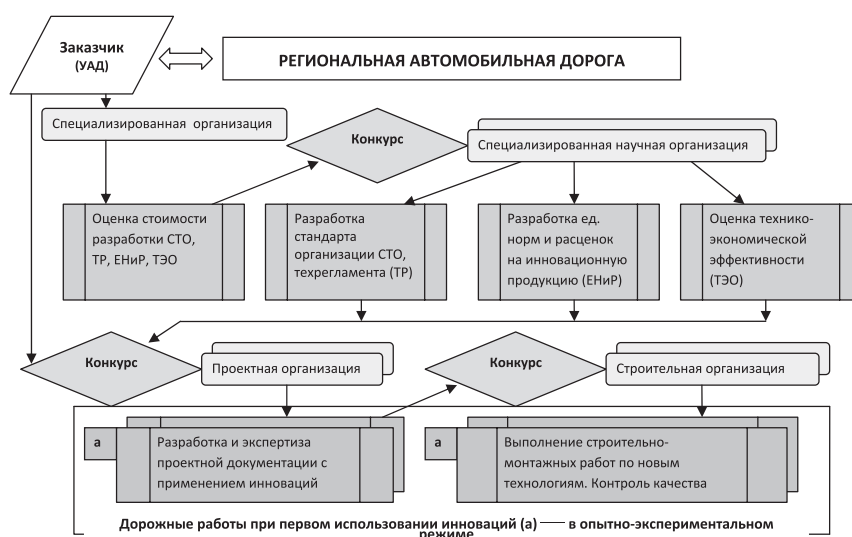


Рисунок 2 — Принципиальная схема внедрения инноваций при проектировании и строительстве автомобильных дорог в условиях конкурса на дорожные работы



Рисунок 3 — Модель жизненного цикла эксплуатации (ЖЦЭ) участка автодороги, искусственного сооружения, построенного по вариантам технологий: базовый (Б) и альтернативный (А) — с применением новых дорожных материалов (ПБВ), $K_{max}=2,5$

В настоящее время эффективность инноваций связывают с финансовыми результатами от инвестиций, вложенных в инновационную деятельность, с расчетом таких показателей инвестирования, как чистый дисконтированный доход (ЧДД), внутренняя норма доходности (ВНД) и срок окупаемости инвестиций на инновации (T_{OK}).

Вопросы технико-экономической оценки эффективности инновационных дорожных проектов рассмотрены в [3, 5—9].

Анализируя различные методы оценки эффективности инноваций, автор работы [5] предлагает объединить методические подходы к оценке эффективности инноваций в две альтернативные группы:

1) оценку эффективности инноваций, характеризующуюся системой показателей, отражающей конечные результаты реализации инноваций;

2) оценку эффективности инноваций в зависимости от жизненного цикла инновационного проекта.

Второй подход, несмотря на необходимость учета дополнительных факторов, связанных с отраслевой особенностью инновационной деятельности, является более продуктивным. С его помощью удастся проследить эффективность проекта на разных этапах жизненного цикла (ЖЦ), а также учесть характерные и важные в техническом отношении особенности объекта внедрения.

В предлагаемом нами методическом подходе рассматривается изменение (как правило, увеличение) межремонтного периода на участке автомобильной дороги (искусственного сооружения). Пример — оценка эффективности полимерно-битумного вяжущего (ПБВ), произведенного на Сухоложской битумно-эмульсионной базе и модифицированного асфальто-бетонного покрытия [9, 10] (рис. 3).

При определении показателей эффективности технологических инноваций, внедряемых в дорожном хозяйстве, в предлагаемой авторской методике за комплексный критерий эффективности на протяжении жизненного цикла принят расчетный (прогнозируемый на основе результатов инновационной деятельности) межремонтный период эксплуатации участка автомобильной дороги, изменяемый с помощью внедряемой технологии, нового материала.

Численным методом определяется ожидаемый экономический эффект ($\mathcal{E}_{OЖ}$) от внедрения инновационной технологии (конструкции, материала) по приведенным затратам, а затем рассчитывается ожидаемый срок окупаемости дополнительных инвестиционных затрат на внедрение.

Данный методический прием использован в ряде технико-экономических обоснований, выполненных ГБУ СО «Управление автомобильных дорог» совместно с отраслевыми научными и проектными организациями (Уральским филиалом РосдорНИИ и УралгипродорНИИ) при внедрении в дорожном хозяйстве Свердловской области полимерно-битумных вяжущих, модификаторов асфальтобетона (КМА КОЛТЕК®), битумно-эмульсионных технологий (ЭМУЛЬДОР®) и новых геосинтетических материалов («СТЕКЛОНИТ», «СЛАВРОС», «ГЕКСА» и др.) [9].

Таким образом, на основе анализа жизненных циклов инноваций, теории и практики инновационной деятельности на транспорте и в дорожном хозяйстве выработаны научно обоснованные алгоритмы и методы управления технологически-

ми инновациями и организационно-техническими нововведениями, которые становятся адаптированными к применению в региональных дорожно-климатических условиях развития транспортной инфраструктуры Свердловской области.

Литература

1. Кошкаргов Е.В., Кошкаргова Т.В. Инновационная политика в транспортных отраслях: прогноз, развитие // Транспорт Урала. 2009. № 1. С. 2—5.
2. Ефимов А.В., Сай В.М. Транспортный полигон высокоскоростных испытаний — необходимое условие развития железнодорожного транспорта страны // Транспорт Урала. 2009. № 2—4; 2010. № 1—3.
3. Ефимов А.В., Самуйлов В.М., Кошкаргов Е.В. и др. Организация и управление инновационной деятельностью на транспорте: теоретические и практические вопросы управления. Екатеринбург : Изд-во УрГУ, 2002. 264 с.
4. Козлов П.А., Осокин О.В., Тушин Н.А. Построение интеллектуальной информационной среды на железнодорожном транспорте // Инновационный транспорт. 2011. № 1. С. 6—9.
5. Гильманова Р.И. Методы оценки экономической эффективности инноваций с учетом их жизненного цикла // Управление экономическими системами : электронный науч. журнал. 2011. № 4 (28). URL : <http://uecs.mcnir.ru/>
6. Кошкаргов В.Е., Самуйлов В.М., Кошкаргов Е.В. Проблемы логистического управления технологическими инновациями на современном этапе // Организация производства. Региональная транспортная логистика : сб. науч. трудов УрГУПС, 2010. Вып. 81 (164). С. 112—124.
7. Кошкаргов В.Е. Инновационная деятельность в дорожном хозяйстве Свердловской области / С.А. Киселев, Н.В. Хамичев, В.В. Гончаров и др. // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог : сб. науч. тр. / ОАО «ГипродорНИИ». Екатеринбург, 2011. Вып. 2 (61). С. 102—113.
8. Кошкаргов В.Е. Битумно-эмульсионные технологии для организации дорожных работ в муниципальных образованиях // Инновации в дорожном строительстве : матерю V Межрегион. конф. «Эффективность и качество». Екатеринбург, 2011. С. 60—61.
9. Дмитриев В.Н., Гриневич Н.А., Кошкаргов Е.В. Новые дорожные технологии и материалы : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУ, 2008. 144 с.
10. Пат. 2297990 Российская Федерация. Полимерно-битумное вяжущее и асфальтобетонная смесь на его основе / Дмитриев В.Н., Кошкаргов В.Е., Черкасова Е.В. и др. Опубл. 27.04.07. Бюл. № 12.

References

1. Koshkarov E.V., Koshkarova T.V. Innovatsionnaya politika v transportnykh otaslakh: prognoz, razvitie [Innovation policy in transport branches: forecast, development] // Transport Urala. № 1. – 2009. S. 2 – 5.
2. Efimov A.V., Say V.M. Transportnyj poligon vysokoskorostnykh ispytaniy – neobkhodimoe uslovie razvitiya zheleznodorozhnogo transporta strany (tsikl statej) [Transport testing areas of high-speed testings — is the necessary condition of country railway transport development (series of articles)] // Transport Urala. № 2,3,4. 2009; № 1,2,3. 2010.
3. Efimov A. B., Samujlov V. M., Koshkarov E.V. i dr. Organizatsiya i upravlenie innovatsionnoj dejatel'nostju na transporte : teoreticheskie i prakticheskie voprosy upravleniya. [Organization and management of innovation activity on transport: theoretical and practical management issues] Ekaterinburg : izd-vo UrGU, 2002. 264 s.
4. Kozlov P.A., Osokin O.V., Tushin N.A. Postroenie intellektualnoj informatsionnoj sredy na zheleznodorozhnom transporte [Building intelligent information environment on railway transport]// Innovatsionnyj transport. 2011. № 1. S. 6—9.
5. Gilmanova R.I. Metody otsenki ekonomicheskoy effektivnosti innovatsij s uchetom ikh zhiznennogo tsikla [Estimation methods of innovations' economic efficiency subject to their life cycle] // Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyj nauch. zhurnal, 2011. №4 (28). URL : <http://uecs.mcnir.ru/>
6. Koshkarov V.E. Problemy logisticheskogo upravleniya tehnologicheskimi innovatsijami na sovremennom etape [Problems of logistic management of technological innovation nowadays] /V.E. Koshkarov, V.M. Samujlov, E.V. Koshkarov // Organizatsiya proizvodstva. Regionalnaja transportnaja logistika: Sb. nauch. trudov UrGUPS. 2010. vyp. 81 (164). S. 112—124.
7. Koshkarov V.E. Innovatsionnaja dejatel'nost v dorozhnom hozjajstve Sverdlovskoj oblasti [Innovation activity in road sector of Sverdlovsk region] / S.A. Kiselev, N.V. Hamicevich, V.V. Goncharov i dr. // Aktualnye voprosy proektirovaniya avtomobilnykh dorog: Sb. nauch. tr. / OAO «GIPRODORNII». Ekaterinburg, 2011. Vyp. 2(61). S. 102—113.
8. Koshkarov V.E. Bitumno-emulsiionnye tekhnologii dlja organizatsii dorozhnykh rabot v municipalnykh obrazovaniyakh [Bituminous-emulsion technologies for organizing road works in municipal organizations] // Innovatsii v dorozhnom stroitel'stve: Materialy V Mezhtregion. konferentsii. Effektivnost i kachestvo / Uralskij Federalnyj okrug. Ekaterinburg, 2011. S.60—61.
9. Patent RF na izobretenie № 2297990 «Polimerno-bitumnoe vjazhushcheye i asfaltobetonnaja smes na ego osnove» [Patent for innovation 'Polymer-bitumen astringent and road-concrete mix on ego base'] /Dmitriev V.N., Koshkarov V.E., Cherkasova E.V. i dr. Opubl. 27.04.2007. Bjul. № 12.
10. Dmitriev V.N., Grinevich N.A., Koshkarov E.V. Novye dorozhnye tekhnologii i materialy [New road technologies and materials]: monografija. Ekaterinburg: Izd-vo UrGU, 2008. 144 s.

УДК 658.3:656.2

Валерий Михайлович Самуйлов, академик Российской академии транспорта, доктор технических наук, профессор кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Владимир Евгеньевич Кошкарлов, аспирант кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕГИОНАЛЬНОМ АВТОДОРОЖНОМ ХОЗЯЙСТВЕ (НА ПРИМЕРЕ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ)

Valeriy M. Samuilov, DSc, Professor, Academician of Russian Academy of Transport, USURT.
Vladimir E. Koshkarov, post-graduate student of 'Economics of transport' chair, USURT

Innovation Activity Development In Regional Road Sector (By The Example Of Sverdlovsk Region)

Аннотация

Приведены результаты исследований и моделирования жизненных циклов при организации производства на транспорте, развитии транспортной инфраструктуры, внедрении новых дорожных технологий, конструкций и материалов.

Особое внимание уделено методологии инновационной деятельности. Предложены подходы к моделированию процессов устойчивого инновационного развития на основе непрерывной генерации технико-технологических инноваций и внедрения результатов прикладных НИОКР.

Предложены функциональные модули управления инновационной деятельностью в транспортно-технологических системах дорожного хозяйства и иерархия систем управления технологическими инновациями, соответствующая современному уровню научно-технического прогресса на транспорте.

Приведены примеры реализации технологических инноваций в дорожных проектах на основе моделирования жизненных циклов модифицированных покрытий автодорог, построенных с применением улучшенных битумов и модификатора асфальтобетона «КМА» КОЛТЕК®.

Ключевые слова: инновационная деятельность, дорожное хозяйство, жизненный цикл, организация производства на транспорте, асфальтобетонное дорожное покрытие, комплексный модификатор асфальтобетона.

Annotation

In the article they are given the results of research and modeling of life cycles when organizing production on transport, development of transport infrastructure, and implementation of new road technologies, constructions and materials.

Special attention is given to methods of innovation activities. They are suggested the approaches to the modeling of stable innovation development processes on the basis of continuous arising of techno-technological innovations and results implementation of applied R&D.

They are offered the functional modules of innovation activity management in transport-technological systems of road facilities and the hierarchy of technological innovations management systems, which meets the modern level of scientific and technical progress on transport.

They are given the examples of realization of technological innovations in road projects, based on modeling of life cycles modified covering of highways, which were built with use of improved bitumen and asphaltic concrete modifier КМА КОЛТЕК®.

Key words: innovation activity, road facilities, life cycle, production organization on transport, asphaltic concrete roadway covering, complex modifier of asphaltic concrete.

Дорожное хозяйство представляет собой транспортно-технологический комплекс, объединяющий сеть автомобильных дорог (федерального, регионального и местного значения), дорожно-строительные и ремонтные предприятия, обслуживающие дорожную сеть, органы управления, выполняющие функции государственного заказчика по строительству, ремонту и содержанию дорожной сети, а также проектные, научные и образовательные организации транспортного комплекса.

К производственной базе дорожного хозяйства относятся также промышленные предприятия по выпуску дорожно-строительных материалов (щебня, битума, асфальтобетонных смесей и др.), дорожной техники, оборудования, дорожных и мостовых конструкций, используемых при строительстве и ремонте автодорог.

Региональное дорожное хозяйство Урала как часть транспортной инфраструктуры страны нуждается в инновационном развитии и обновлении производственной базы [1—4]. Региональным министерством транспорта и дорожного хозяйства разработана «Концепция программы инновационного развития транспортного комплекса Свердловской области», в которой указано на необходимость научного развития методологии инновационной деятельности на транспорте с целью повышения эффективности производства.

Целью настоящей работы является развитие методологии и организационно-технических основ инновационной деятельности в региональном дорожном хозяйстве на базе теорий системного анализа, имитационного моделирования жизненных циклов производственных процессов и функционального соответствия моделей уровню развития техники и технологий на транспорте, применение новой методологии в практике проектирования автодорог.

Исследование жизненных циклов инновационных процессов в транспортно-технологических системах имеет особое значение для разработки эффективных организационно-управленческих решений и повышения конкурентоспособности предприятий транспорта и дорожного хозяйства в современных условиях.

Определение «инновации» подразумевает создание конкретного нового продукта, вида изделия, новой технологии, разработанных и внедренных в производство с общественно-полезными результатами: социальными, экономическими, экологическими эффектами.

Все указанные виды эффектов, а также транспортный эффект должны учитываться при внедрении транспортных и дорожных инноваций на протяжении их жизненного цикла.

В самом общем случае *жизненный цикл* инновационного процесса — это временной этап, на протяжении которого происходит развитие инновации: от момента зарождения до кульминации, затухания (спада) и исчезновения (завершения инновационного процесса). Жизненные циклы могут быть сложными и более простыми, монотонными и неравномерными (дискретными), а также волнообразными и спиралевидными (развивающимися).

С функциональных позиций *жизненный цикл* можно рассматривать как комплексную временную функцию множества переменных, характеризующую технологический процесс (в том числе инновационный цикл) в каждом отдельно взятом промежутке времени и моделируемом в виде временных функций параметров системы. *Жизненный цикл* технологического процесса определяется временем начала и завершения процесса, параметрами функций его содержания.

Математический аппарат для описания набора функции множества переменных может строиться на их системном анализе с использованием теории графов [5].

Предположим, что параметрическая функция (F_{in}) интенсивности (In) осуществляемого инновационного процесса имеет различный вид в период *жизненного цикла* (рис. 1),

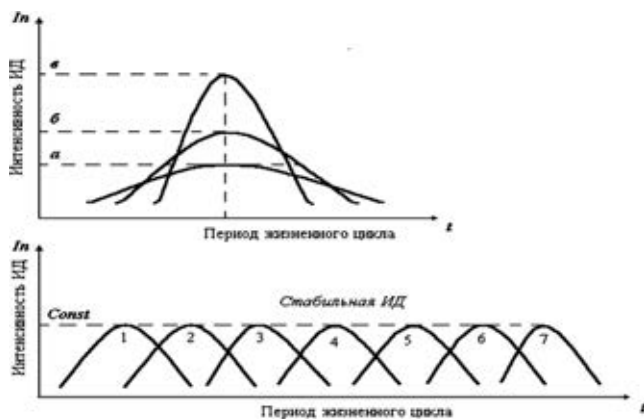


Рисунок 1 — Взаимосвязь инновационной деятельности (ИД) с периодами t жизненного цикла и интенсивностью отдельных инноваций In

$$F_{in} = f(A_1, A_2, \dots, A_n). \quad (1)$$

Тогда отображение интенсивности инновационного процесса (в стоимостных или физических характеристиках) является декартовым произведением множеств $A_1, A_2, \dots, A_n$ параметров независимых переменных, характеризующих *жизненный цикл* отдельной инновации,

$$D = A_1 \otimes A_2 \otimes \dots \otimes A_n. \quad (2)$$

Предположим, что картеж $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ — элемент множества D

$$a_i \in A_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

удовлетворяет некоторому условию $(a_1, a_2, \dots, a_n) \in F$, тогда следует, что элементы находятся в отношении $F: F(a_1, a_2, \dots, a_n)$.

Пусть заданы конечные множества $E_1, E_2, \dots, E_N$ и элементы $e_j \in E_j, j = 1, 2, \dots, N$ находятся в отношении F , т. е. задано $F(e_1, e_2, \dots, e_N)$, и данное отношение допускает геометрическую интерпретацию в виде графа

$$G[E, F(E)]. \quad (4)$$

Данный граф дает элементарную векторную структуру, порожденную отношением на декартовом произведении множеств,

$$E = E_1 \otimes E_2 \otimes \dots \otimes E_N. \quad (5)$$

С помощью данных микроструктур и их численных характеристик (декартовых произведений множеств параметров) может быть задана и построена любая структурная модель сложной системы инновационной деятельности разной интенсивности и типажа а профиля *жизненного цикла* инновационного процесса.

Введенные понятия использовались для построения имитационных моделей и анализа различных типажей *жизненных циклов* инновационной деятельности в транспортно-технологических системах дорожного хозяйства.

При имитационном моделировании развития систем транспорта и дорожного хозяйства использовались методы моделирования функционального соответствия транспортно-технологических систем, изложенные в монографиях [5, 6], эволюционное моделирование *жизненных циклов* инноваций, основанное на спиралевидной модели в координатах «время — знание — капитал» [7], методики анализа организации производственных процессов и создания планетарных организационных систем управления на транспорте. Перечисленные методы подробно изложены в трудах ученых транспортной отрасли: В.С. Боровика (МАДИ) [8], В.Н. Дмитриева (ГипродорНИИ) [4], В.М. Сая (УрГУПС) [9].

Гипотезы инновационного развития как непрерывного движения научного знания и технологического совершенствования производства для разрешения основных противоречий, возникающих на пути научно-технического прогресса (НТП), укладываются в логическую схему параметров «ресурс — потребность — непрерывность» и соответствуют механизмам получения нового научного знания, подтвержденного на практике.

Современная концепция НТП базируется на 5 основных этапах его развития и ускоренном переходе в настоящее время к шестому (табл. 1), связанному с широким использованием в производстве и на транспорте информационных технологий, реализуемых на базе современной электронно-вычислительной техники.

Теоретический уровень развития систем управления инновациями, основанный на моделях функционального соответствия внедренной инновации усовершенствованному или более высокоорганизованному и эффективному производству (в системе транспорта, дорожного хозяйства), исходит из общих предпосылок как эволюционного, так и дискретного (скачкообразного) развития.

Особая роль на современном технологическом этапе отводится внедрению в производство новых систем машин и применению прогрессивных композиционных материалов.

Таблица 1 — Структурно-содержательные составляющие процессов организации производства на этапах НТП [5] (современная интерпретация)

Этапы НТП	Орудия труда, организация производства	Продукт производства
I — первобытно-общинный	Простейшие орудия, отсутствие организации	Минимум продуктов питания и удовлетворения элементарных потребностей
II — появление простейших инструментов и механизмов	Простейшие механизмы и инструменты, механизированно-ручное производство. Элементы организации труда	Появление разнообразия в продуктах питания, одежде, изготовлении инструментов и простейших механизмов
III — изобретение двигателя, паровой машины	Появление машины, системы машин (3-звенной). Мануфактура, появление промышленности	Появление продуктов как результатов производства в отраслях промышленности (пищевой, текстильной...), появление первых транспортных средств (паровоза, автомобиля)
IV — автоматизация производственных процессов	Система машин (4-звенная) и автоматическая система машин (5-звенная). Крупная промышленность, монополии	Продукты изготавливаются крупными сериями, партиями по стандартам в автоматизированных цехах и на автоматических линиях. Серии однотипных транспортных средств (например, выпускаемых марок автомобилей)
V — комплексная автоматизация производства, появление систем управления производством	Автоматизированное и комплексно автоматизированное производство. Система организации и управления автоматизированным производством (КСУ ТП). Корпорации, финансово-промышленные группы	Практически все промышленные товары и продукты потребления массово производятся на автоматических линиях с использованием гибких производственных систем и робототехнических комплексов
VI — развитие информационных технологий, появление интеллектуальных систем управления	Развитая интегрированная интеллектуальная система машин и компьютерных систем управления. Информационные технологии: Интернет, ГИС-системы, навигационные спутниковые системы GPS, ГЛОНАСС. Робототехника, микрочипы в электронике, нанотехнологии в промышленности и на транспорте. Интеллектуальные системы управления производством и транспортом	Продукция производится на роботизированных автоматических линиях, управляемых интеллектуальными системами (на базе компьютерной техники). Рост качества и надежности промышленных продуктов и транспортных средств. Развитие логистики. Создание системы международных транспортных коридоров для трансконтинентального товарооборота

Основой управления производственными процессами при современном технологическом укладе являются интеллектуальные системы управления (ИСУ), компьютеризированная техника и высокоточное оборудование по передаче управляющих воздействий, а также системы позиционирования и навигации.

Такие системы все шире применяются в составе нового оборудования дорожных машин и при производстве дорожно-строительных материалов на установках модульного типа (в производстве фракционированного кубовидного щебня, полимерно-битумных вяжущих, катионных битумных эмульсий, модифицированных асфальтобетонных смесей, геосинтетических материалов).

Для нового технологического уклада в дорожном хозяйстве характерными признаками инновационных технологий являются:

- системность, решение вопросов управления производством на уровне компьютеризированных систем, включая интерактивные, геоинформационные и интеллектуальные;
- достаточная сложность аппаратного оформления и высокая точность контроля заданных параметров системы, применение компьютерных технологий в контроле качества;
- использование композиционных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами на уровне лучших мировых аналогов (например, полимерно-битумные вяжущие и катионные битумные эмульсии на основе подготовленного битумного сырья, а также высококачественных полимеров, эмульгаторов и адгезионных добавок к битуму);
- ресурсо- и энергосбережение в предлагаемых инновационных технических решениях;
- обеспечение наибольших из возможных межремонтных сроков эксплуатации дорожного объекта (конструкции, дорожной одежды, мостового сооружения), направленных на снижение последующих общих эксплуатационных расходов.

Шестой технологический уклад интеллектуальных систем управления приходит на смену пятому (комплексной автоматизации производства в дорожном хозяйстве) и имеет большие перспективы в плане модернизации производственных баз, внедрения новых дорожных технологий и материалов, в повышении производительности труда и качества дорожных работ. Его основа — современные композиционные дорожно-строительные материалы и информационные технологии управления производством, геоинформационные системы проектирования.

Период развития современного этапа НТП — с начала нового тысячелетия, ожидаемый горизонт — не менее 20—30 лет, а развивающие факторы — возможные существенные результаты фундаментальных и прикладных НИОКР, изобретения и новые технические решения в энергетике, информационных и нанотехнологиях.

Рыночные условия инновационной деятельности требуют учета специфики инвестиционных механизмов управления инновациями, новых подходов к моделированию транспортно-технологических систем.

Необходимо структурировать инновационный процесс и выделять отдельные этапы НИОКР, инновационного проектирования и внедрения инноваций, приближающие результаты инновационной деятельности к производству.

Предлагаемые имитационные модели жизненных циклов инноваций должны включать такие признаки и характеристики, как *цикличность*, *усложняемость* (повышение агрегативности), *стохастичность*, *мультипликативность* эффекта от реализации инноваций на транспорте и в производстве. Собственно процесс инновационного развития должен отличаться повторяемостью на качественно новом уровне (использование спиралевидных моделей), агрегативной усложняемостью системы (мультиагентные модели), подчиняться принципам функционального соответствия жизненному циклу, характерному для определенного этапа НТП.

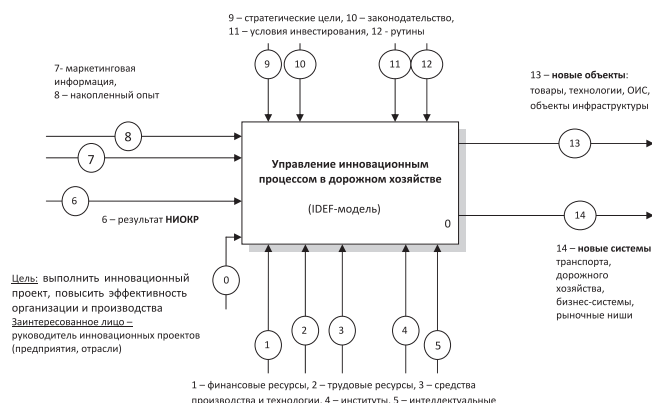


Рисунок 2 — IDEF-модель «Управление инновационным процессом на транспорте и в дорожном хозяйстве»

IDEF-модель «Управление инновационным процессом в дорожном хозяйстве» (рис. 2) объединяет потоки всех видов материальных и нематериальных ресурсов для достижения цели — выполнить инновационный проект, повысить эффективность организации производства на транспорте.

Отсутствие инновационной деятельности на транспорте и в дорожном хозяйстве в современных условиях НТП неизбежно обрекает предприятие на снижение конкурентоспособности и приводит к его гибели (вынужденному завершению жизненного цикла) на рынке производства товаров и услуг.

Комплексный подход к систематизации инноваций представлен в ряде работ [6, 7, 10—12], обобщающих основные теоретические подходы к рассмотрению инновационной деятельности. В частности, автор работы [12] предлагает рассматривать четыре подхода: субъектно-объектный, процессно-продуктовый, функциональный, инвестиционный. Некоторые авторы используют термины «инновация» и «нововведение» как синонимы [4], хотя ряд из них делает четкую границу между этими понятиями [6, 10, 11].

В узком смысле инновация, как и нововведение, — это освоение через внедрение новой техники и технологий улучшенных методов организации производства и управления. В широком смысле инновационная деятельность направлена на разработку и распространение новых видов продуктов (изделий), технологий, организационных форм. Таким образом, инновации являются первичными микроэлементами непрерывного процесса экономического и общественного прогресса.

Отличительными чертами инноваций являются новизна, полезность и эффективность, достигаемые при их внедрении

в практику. Вместе с тем далеко не всякое нововведение в действительности обладает этими чертами — полезностью и эффективностью. Поэтому имеет большое значение разработка критериев и методов оценки нововведений с позиции реального их влияния на технические параметры транспортной системы, производственной базы дорожного хозяйства, а также с точки зрения оценки качества и потребления производственных ресурсов.

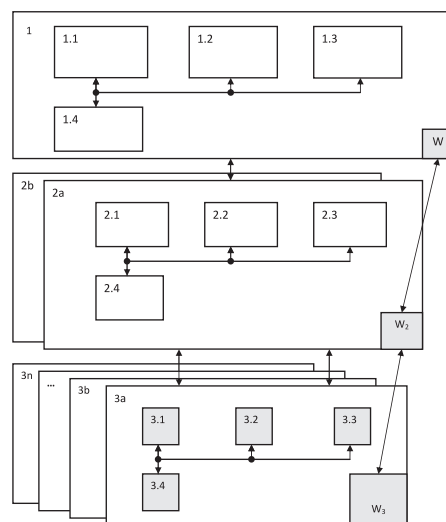


Рисунок 3 — Иерархия систем управления инновациями (по уровням подчиненности)

Уровни подчиненности систем инновационной деятельности (ИД) на транспорте и в дорожном хозяйстве:

уровень 1 (высший, НТП) — общая система управления инновациями (СУИ) — методологический подход;

уровень 2 (средний, прикладной) — отраслевая система управления инновациями, прикладной подход: 2a — на транспорте (СУИтр), 2b — в дорожном хозяйстве (СУИдор);

уровень 3 (объектный) — управление объектами инноваций (ОИ: 3a, 3b, ..., 3n) в отраслях транспорта: по областям исследований — в дорожном хозяйстве, на транспорте и в транспортном строительстве (инновации — кубовидные щебни, полимерасфальтобетон, ЩМА, битумные эмульсии и мастики), в нефтепереработке (тяжелые нефтяные остатки, компаундбитумы, полимерно-битумные вяжущие).
Блоки систем управления: 1.1, 2.1, 3.1 — фиксация регламентируемо-требуемого состояния (ФРТС); 1.2, 2.2, 3.2 — определение критериев и оценка реального состояния системы (ОКОС); 1.3, 2.3, 3.3 — блоки заданий управления инновациями (ЗУИ); 1.4, 2.4, 3.4 — блоки реализации управляющих решений (РУР); W₁, W₂, W₃ — теоретическое развитие научной платформы системы и объектов ИД

Система управления инновационной деятельностью на транспорте и в дорожном хозяйстве может быть выражена иерархической структурой, представленной на рис. 3.

В литературе практически отсутствует информация о системе управления технологическими инновациями в отраслях транспорта, включая дорожное хозяйство. В дорожном хозяйстве, например, на протяжении 10 последних лет раз-

работано только два отраслевых документа федерального уровня, посвященных управлению инновационной деятельностью:

- «Временное руководство по организации освоения инноваций при проектировании, строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог и сооружений на них», утвержденное распоряжением Минтранса РФ № ОС-754-р от 10.09.02;
- «Методические рекомендации по организации освоения инноваций при проектировании, строительстве, реконструкции, капитальном ремонте, ремонте и содержании автомобильных дорог и искусственных сооружений на них в системе Федерального дорожного агентства», утвержденные к применению с 2007 г. письмом ФДА № 01-28/5136от 13.06.2007.

В последнем документе дано узкоспециальное определение характера инновационной деятельности в системе автодорожного хозяйства:

Инновационная деятельность — выполнение и (или) оказание услуг, направленных на создание и организацию производства принципиально новой или с новыми потребительскими свойствами продукции (товаров, работ, услуг); на создание и применение новых или модернизацию существующих способов (технологий) ее производства, распространения и использования; применение структурных, финансово-экономических, кадровых, информационных и иных инноваций (нововведений) при выпуске и сбыте продукции (товаров, работ, услуг), обеспечивающих экономию затрат или создающих условия для такой экономии.

Инновационная продукция — результат инновационной деятельности (товары, работы, услуги), предназначенный для реализации.

Освоение инноваций в дорожном хозяйстве — это применение прогрессивных технологий, материалов, конструкций, машин и механизмов при проектировании, строительстве, реконструкции, капитальном ремонте, ремонте и содержании дорог и сооружений на них.

Опытно-экспериментальное внедрение — первая апробация в производственных условиях (при проектировании, строительстве, реконструкции, капитальном ремонте, ремонте и содержании дорог и сооружений на них) разработанной инновационной продукции.

Внедрение новых технологий, техники, конструкций и материалов — деятельность по освоению инноваций в целях масштабного применения инновационной продукции и введения ее в хозяйственный оборот в дорожной отрасли на транспорте.

На региональном уровне управления дорожным хозяйством (УрФО) документы по управлению инновациями с учетом местных условий практически отсутствуют. Поэтому потребовалось провести исследования, направленные на развитие методической базы регионального дорожного хозяйства на транспорте. Внедрение эффективных разработок, ориентированных на принципиально новый научно-технический результат, направленный на разрешение основных противоречий НТР, должен предусматривать методы программно-целевого построения и оценку эффективности инноваций как минимум с отраслевых позиций с учетом региональных экономических и дорожно-климатических условий.

Эффективная организация производства предусматривает развитие новой технологической платформы производственных баз, систем дорожных машин, автоматизированных комплексов, освоение производства современных дорожных материалов (модифицированных битумов и катионных битумных эмульсий). В связи с этим можно привести следующий пример внедрения эффективных инноваций по результатам проведенных исследований и разработок.

В декабре 2011 г. в Уральском отделении Российской академии транспорта был представлен инновационный проект регионального битумного завода (РБЗ) «КОЛТЕК-БИТУМ» по организации производства на территории Свердловской области высококачественных органических вяжущих для дорожного строительства и модифицирующих добавок в асфальтобетон — «КМА», производимых на основе резины из отработанных автомобильных шин. Реализация проекта планируется на основе частно-государственного партнерства. Проект был принципиально одобрен при рассмотрении в правительстве Свердловской области в январе 2012 г.

Опытно-экспериментальное внедрение резиноасфальтобетона на основе «КМА» КОЛТЕК® (по аналогии с технологиями, реализованными в США и Канаде) позволяет повысить качество асфальтобетона и существенно (в 1,5—2,5 раза) увеличить межремонтные сроки эксплуатации дорожных и мостовых покрытий. Применение «КМА», по данным проектного института УралгипродорНИИ [13], дает ожидаемый экономический эффект в дорожном хозяйстве ($\Delta_{\text{ож}}$) от 10 до 48 млн руб. на 1 км в ценах 2011 г. при устройстве и эксплуатации в условиях Свердловской области автодорог разных категорий с новым типом резиноасфальтобетонного дорожного покрытия. Начиная с 2010 г. в Свердловской области на сети федеральных и региональных дорог были построены первые опытные участки резиноасфальтобетонных покрытий с модификатором «КМА».

Новое проектно-конструкторское решение по применению резиноасфальтобетонного покрытия на основе анализа его жизненного цикла было реализовано УралгипродорНИИ в проекте строительства автомобильной дороги IV технической категории (подъезд к горнолыжному комплексу на горе Долгой протяженностью 2 км от объездной автомобильной дороги вокруг Нижнего Тагила). На федеральной сети резиноасфальтобетон с модификатором «КМА» с успехом был применен в 2011 г. при исправлении колеи участка автодороги М-5 «Урал» (подъезд к Екатеринбург-у Челябинска).

По результатам выполненной работы сделаны выводы о необходимости массового применения резиноасфальтобетона для исправления колеи асфальтобетонного покрытия при ремонте (фрезировании и замене части покрытия картами).

Таким образом, в настоящей работе даны научные рекомендации по развитию транспортно-технологических систем регионального дорожного хозяйства на основе изучения закономерностей инновационной деятельности на транспорте, в промышленности и дорожно-строительном комплексе. Предложены новые подходы к развитию теории и методов управления инновациями на транспорте, в региональном дорожном хозяйстве.

Результаты исследования использованы в технико-экономическом обосновании внедрения модифицированных резиноасфальтобетонных покрытий, в проекте организации

производства на региональном битумном заводе в Свердловской области новых высококачественных видов дорожных вяжущих: улучшенных дорожных битумов (БДУ) из подготовлен-

ного сырья — тяжелой нефти, полимерно-битумных вяжущих (ПБВ), резинобитумных вяжущих и мастик (РБВ, РБМ), катионных битумных эмульсий (ЭБК).

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства РФ № 1734-р от 22.11.08 г. [Электронный ресурс]. URL : // <http://www.rosavtodor.ru/> (дата обращения 20.12.11).
2. Концепция программы инновационного развития транспортного комплекса Свердловской области на 2011—2016 годы (проект) / Правительство Свердловской области. Екатеринбург, 2010. 54 с.
3. Стратегия социально-экономического развития Уральского федерального округа на период до 2020 года : утв. распоряжением Правительства РФ № 1757-р от 06.10.11. Екатеринбург, 2011. 194 с. [Электронный ресурс]. URL : // <http://www.uralfo.ru/> (дата обращения 20.12.11).
4. Дмитриев В.Н. Развитие системы проектирования, строительства и ремонта автомобильных дорог в Свердловской области : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2007. 60 с.
5. Самуйлов В.М. Методология и технология формирования модулей функционального соответствия для повышения эффективности организации производства на железнодорожном транспорте. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 1999. 228 с.
6. Дмитриев В.Н., Гриневиц Н.А., Кошкарлов Е.В. Новые дорожные технологии и материалы : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУ, 2008. 144 с.
7. Кортон С.В. Эволюционное моделирование жизненного цикла инноваций / Институт экономики УрО РАН. Екатеринбург, 2003. 342 с.
8. Боровик В.С. Проектирование организации нововведений в дорожно-строительных работах : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1999. 285 с.
9. Сай В.М. Планетарные структуры управления на железнодорожном транспорте : монография / ВНИИТ РАН. М., 2003. 345 с.
10. Фатхутдинов Р. А. Инновационный менеджмент : учебник. М. : Бизнес-школа «Интел-Синтез», 2000. 624 с.
11. Фатхутдинов Р.А. Организация производства : учебник. М. : ИНФРА-М, 2002. 672 с.
12. Конишева Е.В. Развитие организационно-экономических основ управления инновационной деятельностью университетского комплекса : дис. ... канд. экон. наук. М., 2009. 181 с.
13. Разработка типовых решений для проектирования автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями, модифицированными комплексным модификатором асфальтобетона «КМА» КОЛТЕК® : отчет о НИОКР / ОАО «ГипродорНИИ», Уральский филиал. Екатеринбург, 2011. 24 с. Инв. № 1460-3.4-НИОКР.

References

1. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federatsii na period do 2030 goda. [Transport strategy of the Russian Federation for the period till 2030] (Utv. rasporjazheniem Pravitelstva Rossijskoj Federatsii ot 22.11.2008 g., № 1734-r). URL: // <http://www.rosavtodor.ru/> (obrawenie ot 20.12.2011)
2. Konceptsiya programmy innovatsionnogo razvitiya transportnogo kompleksa Sverdlovskoj oblasti na 2011–2016 gody. [Program concept of innovation development of transport complex in Sverdlovsk Region for the period from 2011 till 2016] (proekt) / Pravitelstvo Sverdlovskoj oblasti. Ekaterinburg, 2010. 54 s.
3. Strategiya sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Uralskogo Federalnogo okruga na period do 2020 goda [Strategy of social and economic development of the Ural Federal District for the period till 2020] (utv. rasporjazheniem Pravitelstva RF ot 6.10.11, № 1757-r). Ekaterinburg, 2011. – 194 s. URL: // <http://www.uralfo.ru/> (obrashchenie ot 20.12.2011)
4. Dmitriev V.N. Razvitie sistemy proektirovaniya, stroitelstva i remonta avtomobilnykh dorog v Sverdlovskoj oblasti. [Development of design system, construction and repair of highways] Diss. ... doktora tekhnicheskikh nauk. Ekaterinburg, 2007. 60 s.
5. Samujlov V.M. Metodologiya i tekhnologiya formirovaniya modulej funktsionalnogo sootvetstviya dlja povysheniya effektivnosti organizatsii proizvodstva na zheleznodorozhnom transporte. [Methods and technology of formation of functional correspondence modules to increase efficiency of industrial engineering on railway transport]. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 1999. 228 s.
6. Dmitriev V.N., Grinevich N.A., Koshkarov E.V. Novye dorozhnye tekhnologii i materialy [New road technologies and materials]: monografiya. Ekaterinburg: izd-vo UrGU, 2008. 144 s.
7. Kortov S.V. Evolyutsionnoe modelirovanie zhiznennogo tsikla innovatsij. [Evolutionary modeling of innovation life cycle] Ekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN, 2003. 342 s.
8. Borovik B.C. Proektirovanie organizatsii novovvedenij v dorozhno-stroitelnykh rabotakh. [Projecting of innovations organization in road and construction works] Diss. ... doktora tekhnicheskikh nauk. M., 1999. 285 s.
9. Saj V.M. Planetarnye struktury upravleniya na zheleznodorozhnom transporte: monografiya. [Planetary management systems on railway transport] M.: VINITI RAN, 2003. 345s.
10. Fatkhutdinov R. A. Innovatsionnyj menedzhment [Innovation management] : Uchebnik. 2-e izd. M. : «Biznes-shkola «Intel-Sintez», 2000. 624 s.
11. Fatkhutdinov R. A. Organizatsiya proizvodstva [Industrial engineering]: Uchebnik. – M.: INFRA-M, 2002. – 672 s.
12. Konyшева E.V. Razvitie organizatsionno-ekonomicheskikh osnov upravleniya innovatsionnoj dejatelnostju universitetskogo kompleksa. [Development of organizational and economic management grounds of university innovation activity] Diss. ... kand. ekonomicheskikh nauk. M., 2009. 181 s.
13. Razrabotka tipovykh reshenij dlja proektirovaniya avtomobilnykh dorog s asfaltobetonnymi pokrytijami, modifitsirovannymi kompleksnym modifikatorom asfaltobetona «KMA» KOLTEK® [Development of standard decisions for designing highways with asphaltic concrete covering, modified complex modifier of asphaltic concrete «KMA» KOLTEK®]: Otchet o NIOKR № 1460-3.4-NIOKR. OAO «GIPRODORNIИ», Ural'skij filial. 2011. 24 s.

УДК 656.13

Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск,
Олег Николаевич Ларин, доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск

ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОПЕРАТОРА В ДИНАМИЧЕСКИХ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Konstantin V. Glemba, PhD, associate professor of assistant professor of 'Motor transport operation' chair of South Ural State University (NRU), Chelyabinsk
Oleg N. Larin, DSc, head of department of 'Motor transport operation' chair of South Ural State University, Chelyabinsk

Review Of Methods For Determining The Operator Reliability In Dynamic Ergatic Systems

Аннотация

Статья посвящена методам повышения безопасности функционирования и взаимодействия элементов системы «водитель — автомобиль — дорога — среда», количественной оценке надежности человека-оператора, выявлению причин развития нестандартных ситуаций при эксплуатации автомобильного транспорта и определению вероятности их появления.

Рассмотрено влияние человеческого фактора на надежность эргатических систем, приведены способы применения математических аппаратов для определения вероятности травмирования человека на примере управления автомобилем. Дан анализ математических методов оценки вероятности возникновения сбоя во взаимодействии элементов эргатической системы с целью определения оптимальных параметров ее функционирования. Приведено моделирование вероятности травмирования водителя при управлении автомобилем

Ключевые слова: человек-оператор, эргатическая система, вероятность, метод, надежность, аварийность, травмирование.

Annotation

Paper is devoted to methods of improving the safety of operation and interaction between elements of the driver-vehicle-road-environment, quantitative assessment of human operator reliability, identifying the causes of abnormal situations in motor transport operation and determination of the probability of their occurrence.

The paper considers human factors influence of ergatic systems reliability, the ways of mathematical apparatus application for determining the probability of people injury are given by the example of car driving. The analysis of mathematical methods for determining the probability of failure in the interaction of ergatic system elements to determine the optimal parameters of its operation. Modeling of driver's injury probability while driving is given.

Key words: human operator, ergatic system, probability, method, reliability, accident, injury.

Человек является центральным и координирующим звеном управления в сложных системах, включающих разнообразное оборудование и системы, функционирующие в условиях противоречивых сигналов, в непрерывно меняющейся обстановке при наличии помех и т. п. Все это обуславливает высокие психофизиологические нагрузки на человека-оператора, принятие им решений сопровождается неопределенностью. Правильность же выполнения операций должна носить многопараметрический и многокритериальный характер, основываться на анализе информации, позволяющей находить достаточно рациональные решения [1, 2].

В настоящее время усложняющиеся технические системы претерпевают рассогласование с возможностями человека, и в то же время они не могут обойтись без него. Частота ошибок, допускаемых человеком при управлении сложными системами, весьма высока. По данным ООН, автотрастатрофы происходят по вине человека в 70—80 % случаев, корабли сталкиваются, тонут и садятся на мель из-за ошибок людей в 64% случаев, а на автомобильном транспорте этот показатель достигает 85%. Недооценка человеческого фактора существенно снижает безопасность функционирования системы, ввиду этого анализ их надежности должен обязательно включать человеческий фактор. Нормальное функционирование эргатических систем, в частности мобильных машин, связано с решением задач обеспечения максимальной эффективности и надежности работы человека-оператора [1, 3].

Внутренние и внешние взаимосвязи сложных систем с участием человека-оператора зависят от большого числа факторов. Оценке поведения человека как звена сложной системы посвящено большое количество исследований, в которых предприняты попытки классификации и оценки личности операторов, а также выяснены зависимости возникновения аварийных ситуаций от личностных качеств человека-оператора. При решении задач повышения надежности эргатических систем необходимо учитывать психофизиологические характе-

ристики, опираясь не только на качественные, но и на количественные оценки надежности оператора [1, 2, 4].

Явление аварийных ситуаций на автотранспорте относится к категории прогнозируемых, связывающих будущее с прошлым. Для их оценки и прогнозирования используются математические методы, которые могут быть разделены на две группы: детерминированные и вероятностные. Первые целесообразно применять, основываясь на принципе соответствия нормативным показателям, вторые — при комплексной оценке вероятности возникновения аварийной ситуации с множеством случайных параметров. Вероятностный принцип оценки безопасности реализуется на основе непрерывного анализа изменения параметров и функций состояния динамической системы и поэтапно-последовательного анализа. Вероятностный подход находит реализацию в применении логико-вероятностного метода, метода дерева отказов, метода марковских процессов, метода статистических испытаний (Монте-Карло) и др. [3, 5, 6].

Привлекательность логико-вероятностного метода (ЛВМ) заключается в его исключительной четкости, однозначности и больших возможностях при анализе влияния любого элемента на безопасность всей системы. Он основан на представлении условий возникновения аварийных состояний системы в виде логических моделей, характеризующихся вероятностью возникновения опасности как соответствующего события при последовательном или параллельном взаимодействии элементов системы. При построении математической модели возникновения опасного события общая вероятность группы событий, расположенных в схеме последовательно или параллельно, определяются [5]:

$$P(\prod_{i=1}^n S_i) = \prod_{i=1}^n P(S_i), \quad (1)$$

$$P(\sum_{i=1}^n S_i) = \sum_i P(S_i) - \sum_{i,j} P(S_i S_j) + \sum_{i,j,k} P(S_i S_j S_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(S_1 S_2 \dots S_n) \quad (2)$$

Модели, построенные на основе ЛВМ, при анализе развития аварийной ситуации позволяют обоснованно взвешивать многие воздействующие факторы, принимать оптимальные решения в условиях неполной информации об элементе системы. Однако следует отметить, что математические модели, построенные на основе ЛВМ, не всегда отвечают требованию строгого соответствия уровню неопределенности используемой информации. Так, применение ЛВМ предполагает точное знание законов распределения случайных величин и их параметров, что не всегда отвечает реальным возможностям получения всего спектра вероятностно-статистического описания, а введение вероятностных показателей аварийности достаточно труднореализуемо, поскольку предполагает наличие большого объема статистической информации. Поэтому по-

строенная логико-вероятностная модель на таких данных не позволит адекватно оценить влияние отдельных факторов на возникновение аварийной ситуации. Кроме того, при построении математической модели ЛВМ пренебрегают целым рядом факторов, например психофизиологическими показателями, параметрами метеорологических условий и др. [5, 6].

Метод *дерева отказов* является логическим методом локализации наиболее проблемных звеньев и элементов эргатической системы. С его помощью можно установить причинные взаимосвязи между исходным состоянием элементов системы и аварийными событиями в ней. Подвергнув их качественному и количественному анализу, можно найти способы усовершенствования системы, что приведет к уменьшению аварийности. При построении дерева отказов в процессе синтеза определяется общий уровень событий, нежелательных для нормальной работы рассматриваемой системы. Все события соединяются с помощью логических символов в соответствии с их причинными взаимосвязями. Логические знаки могут иметь один или несколько входов, но только одно выходное событие. Такое «усложнение» полезно при количественном анализе [4, 7].

При допущении независимости входных событий расчет вероятности конечного события связан с большим количеством вычислений, объединяя события операций «или» и «и»,

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \text{ и } P = \prod_{i=1}^n q_i, \quad (3)$$

где q_i — вероятность появления i -го входного события; n — число параллельных ветвей.

Для успешной количественной оценки надежности системы необходимо определить виды отказов: первичные отказы — результат старения в пределах технических условий, вторичные — возникающие в результате воздействия окружающей среды, дороги, ошибок человека или внутреннего напряжения в системе. Знание вида отказа позволяет уточнить исходные события и провести более точный количественный анализ, однако большие деревья отказов трудны в понимании, не совпадают с обычными схемами протекания процессов и математически неоднозначны, метод требует использования сложной логики. Большинство нарушений в сложных системах нельзя отнести к простым ситуациям типа «работает — не работает», а последствия выхода параметров функционирования систем за установленные границы столь многообразны, что на основании только этого факта последствия невозможно предсказать [2, 3].

У человека-оператора отказами являются ошибки при восприятии, опознании, принятии решений, выполнении управляющих действий, прекращение работы под влиянием стрессовых воздействий и т. п. Надежность деятельности оператора определяется количественно вероятностью безотказной работы в течение времени t [1, 2, 4]

$$P_o(t) = k_o P_{\text{бнл}}(t) P_{\text{пс}}(t), \quad (4)$$

где k_0 — коэффициент готовности оператора, равный вероятности приема информации в произвольный момент времени;

$P_{\text{биол}}(t)$ — биологическая надежность в течение времени t ;

$P_{\text{пс}}(t)$ — психологическая надежность (безошибочность) работы оператора за время t .

Вероятность выполнения оператором определенного алгоритма

$$P_{\text{алг}} = P_{\text{без}} P_{\text{св}}(T), \quad (5)$$

где $P_{\text{без}}$ — вероятность безошибочного выполнения алгоритма;

$P_{\text{св}}(T)$ — вероятность своевременного выполнения алгоритма,

$$P_{\text{св}}(T) = P(T \leq T_{\text{доп}}), \quad (6)$$

где T — время выполнения алгоритма, с;

$T_{\text{доп}}$ — допустимое время выполнения алгоритма, с.

Для *структурного* метода, базирующегося на подробном анализе деятельности оператора с последующим описанием алгоритмов преобразования им информации как совокупности дискретных операций определенного типа, основным является выражение [7]

$$P(\Delta t) \approx 1 - \exp(-\lambda \Delta t), \quad (7)$$

где $P(\Delta t)$ — вероятность того, что в промежутке времени Δt произойдет хотя бы одно событие потока, т. е. промежуток не будет пуст.

Вероятность отсутствия ошибок при выполнении k операций j -го вида при использовании структурного метода рассчитывается по формуле

$$P_k = \exp(-\lambda_j k_j) = \exp(-(1 - p_j)k_j) \quad (8)$$

где $\lambda = n_j / N_j T_j$ — интенсивность ошибок в операциях j -го вида;

$p_j = (N_j - n_j) / N_j$ — вероятность безошибочного выполнения операций j -го вида;

N_j, n_j — общее число операций j -го вида и допущенное при этом число ошибок соответственно, ед.;

T_j — среднее время выполнения операции j -го вида, с.

Вероятность безошибочного выполнения всего комплекса операций определяется по формуле

$$P_0 = \prod_{j=1}^r P_{k_j} = \exp\left(-\sum_{j=1}^r (1 - p_j)k_j\right). \quad (9)$$

Основная трудность при использовании структурного метода заключается в определении вероятностей безошибочного выполнения человеком-оператором каждой оперативной или функциональной единицы (технологической операции) [2, 7].

Операционно-психофизиологический метод основан на расчленении деятельности человека-оператора на отдельные

операции с известными исходными значениями времени, точности и надежности их выполнения, а также значениями психофизиологической напряженности с последующим синтезом структуры деятельности и получением интегральных характеристик. Метод может быть использован при наличии специальных таблиц, значений времени и надежности выполнения простых и типовых действий [4, 7].

Метод *статистического эталона* основан на оценке совокупности количественных показателей (времени и вероятности безошибочного выполнения операций), получаемых при выполнении оператором конкретных действий, в зависимости от сложности операторской деятельности. Сущность метода состоит в условной замене элементов системы ее статистическим эталоном. Ограничения метода определяются диапазоном варьирования факторов сложности при первоначальных экспериментальных исследованиях, по которым получены параметры уравнений регрессии [2, 7].

Моделирование деятельности оператора с помощью *теории массового обслуживания* основывается на параметрах закона распределения случаев выполнения отдельных операций, вероятности безошибочного их выполнения, вероятности выхода системы из строя и др. Ограничение области применения этих моделей скрыто в возможности определения конкретных значений имитируемых параметров для исследуемых условий деятельности человека, а также учета психологически ориентированных и психосоциальных переменных, к которым отнесены возможность возникновения у оператора состояния стресса, психологическая несовместимость операторов, уровень притязаний [1, 2, 7].

Большинству исследований по определению надежности человека-оператора характерны методологические трудности, которые заключаются в следующем: недостаточно известны возможности человека; трудно разложить поведение человека на «элементарные» операции; предположение о независимости «элементарных» операций или ошибок друг от друга часто оказывается неверным. Основная трудность в использовании методов оценки надежности операторов заключается в том, что большинство методик базируется на знании априорных вероятностей безошибочного выполнения операции или заданного алгоритма, в то время как они ориентировочно известны только для узкой области исследованных операций.

Классические математические методы *многокритериального принятия решения* весьма глубоко разработаны и имеют значительные практические приложения, однако не очень адекватны психологической реальности и фактическому поведению человека в сложных обстоятельствах [1, 7].

Вероятностные методы вполне эффективны для технических систем, в которые не включен человек, но мало подходят для отображения явлений и процессов в эргатических системах. Их большая сложность делает невозможным и нереальным решение задачи полной *формализации* протекающих в них процессов с помощью вероятностных моделей, которые оказываются для этих систем слишком «точными»

и не могут быть построены из-за отсутствия необходимой статистической информации. Возникает необходимость использования соответствующего математического аппарата. В этих условиях при построении логико-вероятностных моделей имеющаяся неопределенность можно учесть, используя теорию нечетких множеств, в которой оценки принадлежности элементов нечеткому множеству могут быть результатом обработки заключений экспертов, а модели способны учитывать характер «расплывания» смыслов выражений естественного языка. Формализация интеллектуальных операций, моделирующих нечеткие высказывания человека о состоянии и поведении сложных явлений, образует сегодня самостоятельное направление научно-прикладных исследований, получившее название «нечеткое моделирование». Указанное направление включает комплекс задач, методология решения которых опирается на теорию нечетких множеств, нечеткой логики, нечетких моделей (систем) и граничных вычислений [5—8].

Обобщение понятия множества для более корректного и полного использования описаний тех или иных процессов привело к понятию нечеткого множества [9]

$$\tilde{A} = \{(\mu_{\tilde{A}}(x), x)\}, \quad (10)$$

где $\mu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0, 1]$ — функция, представляющая собой степень принадлежности x к нечеткому множеству $\tilde{A}$, которая ставит в соответствие каждому $x \in X$ число $\mu_{\tilde{A}}(x) \in [0, 1]$;

X — универсальное (базовое) множество;

Нечеткое множество является математической структурой, позволяющей оперировать с относительно неполно определенными элементами, например носителем нечеткого множества $\tilde{A}$ и множеством α -уровня нечеткого множества $\tilde{A}$ в X :

$$\text{Supp } \tilde{A} = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\} \text{ и } A_{\alpha} = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}, \quad (11)$$

$$\alpha \in [0, 1].$$

В силу существенных неопределенностей при моделировании аварийных ситуаций необходима дополнительная информация, которая может быть получена от экспертов, необходимы средства представления и использования этой информации с целью выбора альтернатив на отдельных этапах построения модели. При моделировании аварийных ситуаций использование данных, выраженных с помощью нечетких чисел, может дать больше информации, чем «точная» детерминированная или интервальная оценка. Нечеткое число показывает одновременно «пессимистическое» и «оптимистическое» представление о диапазоне изменения рассматриваемой величины, а вершина нечеткого числа содержит наиболее точное значение [3, 9].

Применение теории нечетких множеств (ТНМ) при моделировании аварийных ситуаций имеет основополагающие компоненты, которые способствуют решению задач безопасности. Введение понятий нечеткой и лингвистической переменных, нечеткого множества и отношения обе-

спечивает формализацию многих качественных и количественных нечетких понятий, объектов, событий. Обработка нечеткой информации обеспечивается применением лингвистического подхода, позволяющего использовать для описания элементов структурной модели приближенные, субъективные оценки, формализуемые с помощью нечетких чисел и лингвистических переменных, т. е. оперировать формализованными объектами посредством аппарата ТНМ. Использование лингвистического подхода позволит задать численное описание отдельных элементов логической модели развития аварийной ситуации, связанных с ошибочными действиями персонала при наличии нечеткой информации. Распространенные методы моделирования аварийных ситуаций имеют общий недостаток, обусловленный трудностями определения конкретных вероятностей тех или иных событий. Решить эту проблему можно с помощью приложения к вышеуказанным методам аппарата ТНМ, заполняющего пробел в области структурированной неопределенности там, где нельзя корректно применять статистику и вероятности [8—10].

Аппарат ТНМ может быть использован не только для оценки вероятностей возникновения аварийных ситуаций, прогноза травматизма, но и для определения эффективности средств обеспечения безопасности, для формирования требований к этим средствам. Модели статических и динамических систем, построение, использование и анализ которых базируется на положениях ТНМ и нечеткой логики, называют нечеткими моделями или нечеткими системами. Типичный пример системы, хорошо поддающейся реализации с помощью нечеткой логики, — антиблокировочная тормозная система, управление которой осуществляется по двум входным параметрам: проскальзыванию колеса и радиальному ускорению колеса. Оба параметра представляются в виде логических переменных с набором из 5—8 термов каждая (например, «отсутствует», «слабое», «среднее», «сильное», «очень сильное» и т. п.), на основании которых вычислитель, используя набор правил, получает значение давления в тормозном цилиндре, стремясь к поддержанию оптимального проскальзывания [7].

Представление вероятностей состояния элементов структурной модели травмирования, построенной на основе ЛВМ в виде нечетких чисел, позволяет не только учесть неопределенность имеющейся информации, но и добиться большей точности при определении вероятности конечного события, которая также будет представлять собой нечеткое число. Вероятность травмирования человека-оператора в ветви структурной модели, содержащей последовательно соединенные зависимые события A_n , определяется по теореме умножения вероятностей зависимых событий

$$P(F) = P(A_1)P_{A_1}(A_2)P_{A_1 A_2}(A_3) \dots P_{\prod_{i=1}^{n-1} A_i}(A_n), \quad (12)$$

где $P_{\prod_{i=1}^{n-1} A_i}(A_n)$ — условная вероятность события A_n , вычисленная в предположении, что событие $\prod_{i=1}^{n-1} A_i$ уже произошло.

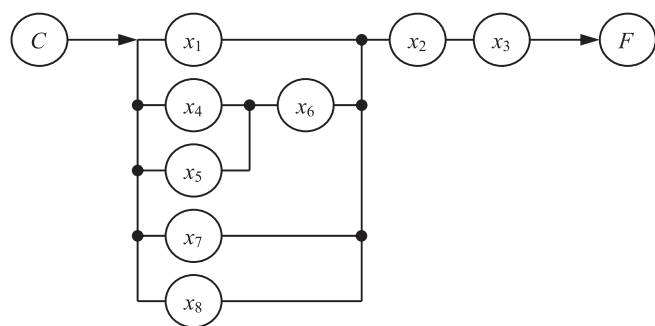


Рисунок 1 — Логическая схема вероятности травмирования водителя в процессе управления автомобилем:

C — исходное событие (безопасное состояние системы);

F — конечное событие (травмирование водителя); x_1, x_2, x_3 — конструктивное несовершенство средств активной пассивной и послеаварийной безопасности соответственно; x_4 — низкий уровень квалификации водителя; x_5 — несоответствующее психофизиологическое состояние водителя; x_6 — несоблюдение ПДД; x_7, x_8 — неудовлетворительное состояние подсистем «дорога» и «среда»

В случае параллельного включения зависимых событий в структурную модель каждая пара событий, имеющих вероятности p_i и p_j , заменяется одним элементом с вероятностью $1 - (1 - p_i)(1 - p_j)$, где p_i и p_j — вероятности, вычисленные с

учетом зависимости событий. Если вероятность события A_i , соответствующего элементу структурной модели, изменяется в зависимости от того, произошло событие A_j или нет, то она может быть вычислена по формуле

$$P_i^* = P(A_i + \frac{A_j}{A_j}) = P(A_i) + P_{A_j}(A_i) - P(A_i)P_{A_j}(A_i), \quad (13)$$

где $P(A_i)$ — собственная вероятность события A_i ;

$P_{A_j}(A_i)$ — условная вероятность события A_i , вычисленная в предположении, что событие A_j произошло.

Следует учесть, что при логико-вероятностном моделировании повышение точности определения вероятности возникновения и развития аварийной ситуации обеспечивается с учетом взаимного влияния отдельных событий. Рассмотрим моделирование процесса управления автомобилем, выстраивая логическую цепь событий, способствующих развитию аварийной ситуации на дороге. Для установления причинно-следственных связей между исходным, промежуточными и конечными событиями требуется тщательный анализ данных статистики травматизма, нормативной документации и др. На рис. 1 приведен пример логической схемы вероятности травмирования человека-оператора (водителя) в процессе управления автомобилем (с возрастанием числа участников движения схема требует корректировки) [4, 5].

Основной характеристикой любого элемента модели логико-вероятностного моделирования является вероятность возникновения события, соответствующего данному эле-

менту. Каждому элементу x_i логической схемы соответствует определенное значение $\tilde{p}_i$ вероятности отказа, численное значение которого определяется на основе данных результатов исследований [5]. Вероятность травматизма в логической модели (см. рис. 1) рассчитывается с использованием теорем умножения вероятностей для последовательно соединенных элементов и теорем сложения вероятностей для элементов, включенных в модель параллельно. Получаем выражение для определения вероятности травматизма водителя при управлении автомобилем, применимой к модели рис. 1,

$$\tilde{P}(F) = 1 - (1 - \tilde{p}_1 \tilde{p}_3 (1 - (1 - \tilde{p}_1)(1 - \tilde{p}_3)(1 - \tilde{p}_6(1 - (1 - \tilde{p}_4)(1 - \tilde{p}_5))))). \quad (14)$$

Поскольку все вероятности, входящие в приведенную формулу, нечеткие, то и вероятность травматизма представляет собой нечеткое множество чисел. Таким образом, применение аппарата ТНМ позволяет существенно уточнить результирующее значение при определении вероятностей возникновения как отдельных событий в логико-вероятностной модели аварийной ситуации, так и конечного события (травмирования), что необходимо для оценки значимости (эффективности) средств обеспечения безопасности и объективного формирования технических требований к каждому из этих средств. Применение аппарата ТНМ позволяет учесть неопределенность исходной информации и получить хотя и нечеткий, но тем не менее более точный конечный результат.

В вероятностно-статистических терминах пытаются свести к минимуму неопределенности с помощью моделей, основанных на тех или иных вариантах вероятностного аппарата, которые препятствуют организации безопасного функционирования сложных систем. Однако при формировании математических моделей существует требование их строгого соответствия уровню неопределенности используемой информации, что наилучшим образом позволяет строить адекватные математические модели для распознавания и предупреждения аварийных ситуаций. Следует подчеркнуть, что аппарат ТНМ обеспечивает возможность заполнения пробела в области учета неопределенности там, где вероятностно-статистические методы нельзя корректно применять [4].

В заключение следует отметить, что анализ математических методов, применяемых для оценки и прогнозирования возникновения аварийных ситуаций в динамических эргатических системах, показал, что каждому из них присущи как достоинства, так и определенные недостатки, обусловленные отсутствием достоверной информации по ряду показателей. Применение аппарата ТНМ обеспечивает повышенную точность определения вероятности возникновения нештатных или развития аварийных ситуаций при наличии зависимых событий в логико-вероятностной модели. Эволюционное развитие формализма нечетких множеств привело к появлению области исследований анализа нечетких временных рядов, которые могут стать новым инструментом моделирования динамики и описания процессов, функционирующих в условиях «нестохастической» неопределенности.

Литература

1. Присняков В.Ф., Приснякова Л.М. Математическое моделирование переработки информации оператором человеко-машинных систем. М. : Машиностроение, 1990. 247 с.
2. Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек — техника. М. : Машиностроение, 1983. 263 с.
3. Аверкин А.Н. Нечеткие числа в системах искусственного интеллекта и управления. Тверь : СНИИ, 1991. 11 с.
4. Безбородова Г.Б., Галушко В.Г. Моделирование движения автомобиля. Киев : Высшая школа, 1978. 168 с.
5. Рябинин А.И., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно сложных систем. М. : Радио и связь, 1981. 264 с.
6. Борисов А.Н., Алексеев А.В., Крумберг О.А. и др. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной. Рига : Зинантне, 1982. 256 с.
7. Ярушклина Н.Г., Афанасьева Т.В., Перфильева И.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 320 с.
8. Горбачев С.В., Глемба К.В. Влияние на безопасность движения уровня формализации информационного потока в эргатических системах // Вестник Оренбургского государственного университета. Оренбург : ОГУ, 2011. № 10 (129). С. 88—93.
9. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М. : Радио и связь, 1982. 432 с.
10. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. Рига : Зинантне, 1990. 184 с.

References

1. Prisnjakov V. F., Prisnjakova L. M. Matematicheskoe modelirovanie pere-rabotki informatsii operatorom cheloveko-mashinnykh sistem. [Mathematical modeling of information processing by man-machine systems' operator] M. : Mashinostroenie, 1990. 247 s.
2. Shibanov G. P. Kolichestvennaja otsenka dejatel'nosti cheloveka v siste-makh chelovek–tekhnika. [Quantitative assessment of human activities in the systems of man–equipment.] M. : Mashinostroenie, 1983. 263 s.
3. Averkin A. N. Nechetkie chisla v sistemakh iskusstvennogo intellekta i upravlenija. [Fuzzy numbers in artificial intelligence systems and control]. Tver : SANI, 1991. 11 s.
4. Bezborodova G. B., Galushko V. G. Modelirovanie dvizhenija avtomobilja. [Modeling of a car movement]. Kiev : Vysshaja shkola, 1978. 168 s.
5. Rjabinin A. I., Cherkosov G. N. Logiko-verojatnostnye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno slozhnykh sistem. [Logical-probabilistic methods of studies of structurally complex systems' reliability]. M. : Radio i svjaz', 1981. 264 s.
6. Borisov A. N., Alekseev A. V., Krumberg O. A. [i dr.]. Modeli prinjatija reshenij na osnove lingvisticheskoj peremennoj. [Decision-making models based on linguistic variable.] Riga : Zinantne, 1982. 256 s.
7. Jarushkina N. G., Afnasjeva T. V., Perfiljeva I. G. Intellektualnyj analiz vremennyh rjadov : ucheb. posobie. [Intelligent analysis of time series : training manual]. Uljanovsk : UIGTU, 2010. 320 s.
8. Gorbachev S. V., Glemba K. V. Vlijanie na bezopasnost dvizhenija urovnja formalizatsii informatsionnogo potoka v ergaticheskikh sistemakh [The effect of information flow formalization level in ergatic systems on traffic safety] // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. Orenburg : OGU, 2011. № 10(129). S. 88-93.
9. Kofman A. Vvedenie v teoriju nechetkikh mnozhestv. [Introduction to the theory of fuzzy sets.] M. : Radio i svjaz, 1982. 432 s.
10. Borisov A. N., Krumberg O. A., Fedorov I. P. Prinjatie reshenij na osnove nechetkikh modelej. Primery ispolzovaniya. [Decision-making based on fuzzy models. Examples of use]. Riga : Zinantne, 1990. 184 s.

УДК 338.47

Елена Юрьевна Кузнецова, доктор экономических наук, заведующая кафедрой «Организация машиностроительного производства» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург

СТРАТЕГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ РОССИЙСКИХ АВИАТРАНСПОРТНЫХ КОМПАНИЙ

Elena Yu. Kuznetsova, DSc, head of a chair 'Organization of engineering industry' of the Ural Federal University named after Boris N. Eltsyn - the First President of Russia

Strategies To Provide The Competitiveness Of Russian Air-Transport Companies

Аннотация

Российские авиатранспортные компании стоят перед выбором стратегии развития. Мировая практика демонстрирует различные варианты стратегии минимизации издержек путем создания альянсов, использования франчайзинга, дискаунта и развития рынка. Часть из этих стратегий может быть использована российскими авиакомпаниями для обеспечения конкурентоспособности на внутреннем и мировом авиарынке.

Ключевые слова:

стратегия развития, альянс, франчайзинг, дискаунтер, развитие рынка.

Annotation

Russian air-transport companies face a choice of development strategy. The world practice of such markets development shows different variants of a strategy for minimizing expenses by establishing alliances, using franchising, discount and market development. Some of the strategies presented on the world market can be used by Russian air-transport companies to provide competitiveness in the local and world air-transport market.

Key words:

development strategy, alliance, franchising, discount, market development.

Российский авиатранспортный рынок находится в постоянном развитии. Любая авиакомпания — это бизнес, который должен быть выгодным для хозяина-собственника и полезным для своего потребителя.

Среди современных стратегий обеспечения конкурентоспособности, лежащих в основе реструктуризации авиарынка, отметим 4 основных:

- создание альянсов;
- франчайзинг;
- стратегия низких издержек (дискаунт, или лоу кост);
- развитие рынка.

Очевидно, что на данном этапе развития российского рынка не все стратегии в одинаковой степени актуальны [1]. Тем не менее их знание и понимание позволяет реализовать прогностическую функцию науки: через некоторое время эти стратегии будут актуальны и для нашего рынка.

Первая из упомянутых — это стратегия *образования альянсов*, или ассоциативных форм организации управления. Альянсы способствуют выработке согласованной политики относительно поведения на рынке, поскольку их участники координируют свои действия и воздерживаются от получения индивидуальных краткосрочных выгод, отдавая приоритет ожидаемым долгосрочным преимуществам.

В основе образования альянсов лежат различные причины, главными из которых можно назвать следующие.

- экономия на транзакционных издержках;
- получение доступа к новым знаниям или ноу-хау [2, 3];
- стремление авиакомпании сохранить собственные ценные ресурсы, которые в данный момент востребованы не полностью. Фирма компенсирует эту невостребованность путем комбинирования собственных ресурсов с ресурсами партнера [4];
- инновационные причины вступления в альянсы — доступ к новым технологиям, снижение издержек на инновации. Альянсы позволяют вовлекать предприятия малого и среднего бизнеса в международную деятельность, включаться в глобальную экономическую среду, не теряя своей специализации; альянсы позволяют объединить усилия по внедрению новых стандартов и принципов работы там, где они еще не получили соответствующего оформления [5].

Майкл Портер отмечает, что чаще используют альянсы фирмы, стремящиеся догнать отраслевых лидеров и найти

более быстрые и менее дорогие пути привлечения ресурсов [6]. В настоящее время тенденция к образованию стратегических альянсов обусловлена также и тем, что «современные пассажиры» заинтересованы в получении высококачественных услуг по всему миру, и именно альянсы могут обеспечить единый уровень предоставляемых услуг и широкую обслуживающую сеть.

Наибольшее значение в авиационном сообществе имеют глобальные альянсы *Star Alliance*, *Sky Team*, *Oneworld*.

В настоящее время крупнейший альянс *Star Alliance* расширяет сеть своих маршрутов: в частности, ищет возможности привлечения партнеров из стран Юго-Восточной Азии, Африки и Ближнего Востока, а также присматривается к идее включения в альянс компаний и организаций, не занимающихся воздушными перевозками, например железнодорожные компании.

Если изначально перед альянсом ставилась задача повысить объем перевозок за счет интеграции программ часто летающих пассажиров и совместного использования помещений для отдыха пассажиров, единой процедуры оформления багажа, то теперь в качестве приоритетной рассматривается задача интеграции ресурсов альянса, чтобы за счет снижения издержек повысить показатели рентабельности. В планах альянса предусмотрено решение таких задач, как:

- укрепление позиций на рынке воздушных перевозок путем повышения качества предоставляемых услуг и обеспечения гарантированного уровня качества обслуживания по всей сети маршрутов альянса;
- совершенствование системы продажи билетов (on-line-продажи);
- унификация оснащения кабин летчиков и управления основными системами самолетов путем применения типовых комплексов мероприятий по модернизации самолетов определенных типов, например семейства A320 производства Airbus Industry, что поможет существенно снизить расходы и позволит в случае необходимости легко передавать самолет экипажу другой авиакомпании — члену альянса. В будущем приобретение любой новой авиационной техники предполагается осуществлять при условии выполнения стандартных требований к унификации оборудования и оснащению самолетов. К числу первых таких самолетов относятся A340-500/600, заказанные Lufthansa и Air Canada. Благодаря внедрению единых стандартов снизятся цены на технику, упростится ее эксплуатация и обслуживание, что приведет к сокращению общих издержек на 3%;
- совместное материально-техническое обеспечение, снабжение и закупки. Поначалу этим процессом будут охвачены самолетные системы, в частности бортовая система заполнения досуга пассажиров, а затем и другие бортовые системы, сам самолет и двигатели;
- объединение усилий в областях, не связанных с пассажирскими перевозками (организация грузовых перевозок, проведение технического обслуживания). Некоторыми из членов альянса уже созданы соответствующие совместные предприятия с участием двух и большего числа партнеров. Например, авиакомпаниями United Airlines, Lufthansa и Air Canada образовано совместное предприятие по изучению

рынка сбыта бывших в употреблении запасных частей. Lufthansa и SAS начали сотрудничать в области грузовых перевозок, а Lufthansa и Varig приступили к обсуждению возможностей совместного обучения летного состава.

В *Sky Team* (второй альянс), наряду с *Air France*, главенствует *Delta Airlines*. В 2006 г. в него вошел «Аэрофлот». Кроме «Аэрофлота», к участию в альянсе привлекаются три китайские авиакомпании, что дает членам альянса, особенно американским *Continental* и *Northwest*, неограниченный доступ на рынок Китая в связи с подписанием американо-китайского соглашения об «открытом небе». На долю этого альянса приходится порядка 20% общемирового объема авиаперевозок. Некоторые параметры деятельности альянса представлены в таб. 1.

Таблица 1 — Альянс *Sky Team**

Члены альянса	Дата вступления	Объем перевозок, млн пасс-км	Перевозки пассажиров, млн чел.	Доходы, \$млн
<i>Aeromexico</i>	Август 1995 г.	13649	9,3	1286
<i>Air France</i>	Август 1995 г.	101644	43,7	14521
<i>Alitalia</i>	Июнь 1997 г.	31626	22,5	4196
<i>Continental</i>	Сентябрь 2004 г.	99259	39,9	8870
<i>ČSA</i>	Февраль 1997 г.	5084	3,6	0563
<i>Delta Airline</i>	Август 1995 г.	158766	104,5	13303
<i>Korean Air</i>	Июль 1996 г.	57784	19,0	5180
<i>Northwest Airlines</i>	Сентябрь 2004 г.	110247	21,7	9510
<i>KLM</i>	Сентябрь 2004 г.	57784	51,9	6912
«Аэрофлот»	Апрель 2006 г.	20751	6,7	2219
Итого		634791	322,7	67279
Доля в мировых перевозках, %		19,1	18,0	18,6

* Данные IATA, 2007 г.

В третьем альянсе *One world* основными игроками являются *British Airways* и *American Airlines*.

Итак, три глобальных альянса выполняют половину всех мировых авиаперевозок, а их доля в доходах превышает 57%.

В русле поддержания конкурентоспособности и завоевания рынков сбыта лежит и такой инструмент, как *франчайзинг*, его можно рассматривать в качестве второй глобальной стратегии авиарынка.

Перевозчики-франчайзи используют все атрибуты франчайзера, т. е. соответствующую символику на самолетах, форму стюардесс, бланки билетов, оформление стоек регистрации и т. д. Со своей стороны они платят фиксированную сумму за использование торговой марки и, в зависимости от соглашения, тот или иной процент с оборота по деятельности под маркой франчайзера. Кроме прямых денежных поступлений (подчас весьма незначительных), для больших международных авиакомпаний франчайзинг обеспечивает возможность развивать сеть маршрутов, особенно региональных, без необходимости значительных инвестиций для формирования специального парка региональных самолетов малой вместимости, получения лицензии на полеты, организации инфраструктуры в местном аэропорту. Основное преимущество для франчайзера кроется в том, что компании, работающие на условиях франчайзинга, существенно подпитывают своих партнеров, подвозя

пассажиров на стыковочные рейсы. Помимо этого работа по схеме франчайзинга может помочь компании-франчайзеру избежать проблем с антимонопольным комитетом в вопросе об аэропортовых слотах, поскольку франчайзи формально является независимой компанией. А потому к сотрудничеству по схеме франчайзинга в авиатранспорте приходят все больше региональных перевозчиков.

Еще одной стратегией роста конкурентоспособности и завоевания рынка сбыта является стратегия «без излишеств», которая привела к появлению авиакомпаний-дискаунтеров, или так называемых *низкозатратных перевозчиков, лоукостеров (Low Cost Carriers — LCC)*.

Эти компании заявили о себе в конце 1990-х гг., а после наступившего в 2001 г. кризиса принципы LCC применяют все большее число авиакомпаний, включая даже такие, как *Southwest Airlines* и *US Airways*. Самые известные и успешные дискаунтеры — английская *Easy Jet* и ирландская *RyanAir*, являющаяся доминирующим перевозчиком на 88 из 155 европейских маршрутов.

Дискаунтеры строят свою работу на всемерном сокращении расходов, прежде всего расходов на обслуживание пассажиров. В частности, бортовое питание не предоставляется вовсе или только за отдельную плату. Сокращается экипаж в кабине, в салонах нет разделения по классам, багаж по принципу «при себе», перебронирование и изменение даты вылета исключаются. Существенна экономия и на отсутствии офисов по продаже билетов: места на борту бронируются через Интернет.

Еще один способ уменьшения расходов — использование воздушных судов одного типа, что дает экономию на обучении летного персонала, на затратах по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР), на закупке запасных частей, а также готовность LCC пользоваться малоудобными слотами — ночными или ранними утренними, что прилично снижает аэропортовые сборы. Кроме того, дискаунтеры готовы летать из аэропортов с минимальным оборудованием пассажирских залов.

Бизнес LCC развивается успешно: «обычные» авиакомпании с 2000 г. сократили свои провозные возможности на 16,8%, а дискаунтеры увеличили их на 25,9%. Доля выполненных ими за пять лет пассажирских перевозок выросла с 18 до 26% от всех пассажирских перевозок на внутренних воздушных линиях.

Четыре господствующие в США компании LCC совместно имеют 65% всех располагаемых провозных мощностей, а в ближайшем будущем собираются их еще увеличить. Дискаунтеры интенсивно расширяют свои возможности: *Southwest*, *Jetblue*, *Frontier* и *Spirit* увеличили за последнее время парк на 250 воздушных средств. Они осуществляют 37% коммерческих перевозок в 35 крупнейших аэропортах США. На их долю приходится 922 пары пунктов прямого воздушного сообщения (от пункта взлета без промежуточной посадки до пункта назначения), в которых перевозится до 85% всех прямых пассажиров. И если регулярные сетевые перевозчики США за первую пятилетку XXI в. понесли суммарные убытки на сумму \$20 млрд при снижении эксплуатационных доходов на четверть, то дискаунтеры повысили доходы на 12%.

Число LCC увеличивается во всем мире с темпом прироста 3—4% в год.

В Азии LCC-компании тоже набирают силу. Малазийская *Air Asia* в 2005 г. перевезла 4 млн пассажиров, имея в парке 24 самолета. В Сингапуре действуют *Veluair* и *Tiger Airways*, третья компания — *Jet Star Asia Airways* — находится в совместном владении группы *Qantas* и *SIA* (Сингапур).

В Латинской Америке наиболее успешной из LCC является бразильская *GOL*, которая охватывает около 20% рынка пассажирских перевозок. В Канаде успешное развитие *WestJet* послужило одной из причин банкротства национального перевозчика *Air Canada*.

Обобщая опыт реализации этого типа стратегии, отметим, что низкозатратные компании провозглашают в качестве своей главной цели безопасность и обслуживание потребителей, которые рассматриваются как элементы сильной и динамичной корпоративной культуры. Бизнес-модель включает следующие основные компоненты:

- плотная маршрутная сеть (авиасообщение между крупными аэропортами, обслуживающими большое количество пассажиров, высокая частота полетов);
- сильная, известная торговая марка (чрезвычайно высокая осведомленность потребителей о марке поддерживается новаторской и эффективной политикой);
- динамичные тарифы (простая структура тарифов; чем раньше заказываешь билет, тем меньше платишь; стремление к тому, чтобы тариф был самым низким на данном маршруте; тарифная система построена на колебаниях спроса);
- только прямые продажи (нет комиссионных посредникам, более 90% продаж — онлайн);
- функциональный авиапарк (большой, современный, экономичный и относительно экологически безопасный парк преимущественно однотипных самолетов, позволяющий упростить и удешевить их техническое обслуживание);
- снижение единичных затрат благодаря высокому уровню использования активов;
- возможности расширения деятельности за счет снижения предельных издержек на увеличение масштабов, возрастающая экономия на масштабе.

Четвертая стратегия, используемая авиаперевозчиками, — стратегия *расширения рынка*. Руководство немецкой *Lufthansa*, подталкиваемое обостряющейся конкуренцией, связанной с дальнейшей интеграцией экономик государств ЕС, приняло стратегию ускорения глобализации своей компании. На международном рынке авиаперевозок входные барьеры относительно низкие, так как большинство национальных компаний субсидируются правительствами. Стратегия глобализации *Lufthansa* предполагает, что она будет стремиться попасть в основной состав игроков на мировом рынке. Ее планы включают создание глобальной сети обслуживания, заключение союзов с авиаперевозчиками в других регионах, интернационализацию издержек, стимулирование желания менеджеров работать на различных рынках и повышение культуры обслуживания, призванной соответствовать ожиданиям самых разных клиентов.

Уже в 1996 г. доходы компании, полученные от эксплуатации авиарынка в самой Германии и за рубежом, уравнились. Однако в ФРГ работает 80% сотрудников компании, и на нее приходится 65% издержек. Наем немецких работников обо-

дится очень дорого (в связи с требованиями законодательства ФРГ), и менеджмент полагает, что для поддержания конкурентоспособности на международном уровне необходимо снижение издержек. Один из методов экономии — перевод некоторых административных функций и функций обеспечения основной деятельности в более «дешевые» страны (например, техническое обслуживание авиалайнеров осуществляется в Ирландии).

Итак, изучение стратегий развития зарубежных авиакомпаний ставит следующие вопросы: какие варианты развития российского авиатранспортного комплекса подсказывает изученный мировой опыт, какие стратегии приемлемы для российских авиакомпаний?

Возможно ли использование идеи создания *альянсов*? Наверное, возможен альянс российских авиатранспортных компаний — крупнейших столичных — и достаточно влиятельных на своих географических рынках региональных. К этому пока не готов менеджмент наших авиакомпаний, который стремится к независимости и самостоятельности и стремится заполучить кусок от общего пирога авиатранспортных перевозок. То есть степень развития отечественного рынка пока такова, что компании в большей мере нацелены на рост, а не на обеспечение стабильности, как это происходит на развитых рынках.

Что касается создания альянсов крупнейших российских авиакомпаний и железнодорожного транспорта, то здесь тоже немало проблем, которые скорее тормозят, чем способствуют развитию ситуации по данному сценарию. От большинства стран мира Россия отличается размерами территории. В любой западной стране, создавшей подобные альянсы, существует одна крупная базовая авиатранспортная компания и национальная железнодорожная компания. В России ведущих авиакомпаний несколько: «Аэрофлот», «Трансаэро», S7 Airlines («Сибирь»), «ЮТэйр» (UTair), «Россия»; «Уральские авиалинии» вместе с еще 13 авиакомпаниями относятся к разряду крупных, кроме того, еще есть региональные (29), грузовые (9) и несколько чартерных. РЖД покрывает всю сеть России, где в некоторых географических точках до сих пор нет работоспособных коммуникационных сетей, несмотря на то, что структура РЖД имеет планетарный характер [7]. Поэтому подобный альянс пока технологически нереален.

В настоящее время возможно только вступление российских авиатранспортных компаний в уже существующий международный альянс авиаперевозчиков при соблюдении выдвигаемых ими условий и требований [8].

Что касается использования *франчайзинговых* схем, то эта стратегия приемлема опять-таки для крупнейших авиатранспортных компаний, таких как «Аэрофлот», «Трансаэро» и некоторых других, которые могут предлагать франчайзинг региональным игрокам с целью минимизации издержек. Руководство же региональных авиакомпаний предпочитает сохранять независимость и самостоятельность, конкурируя на пределе своих возможностей. Местные авиаперевозки уже практически не существуют: спрос с начала перестройки резко упал, аэропортовые комплексы пришли к негодности, поэтому франчайзинговую схему распространять не местную авиацию, как это происходит в Западной Европе, не представляется возможным.

Стратегия компаний-дискаунтеров на российском рынке продержалась 5 лет: с 2006 по 2011 г. Это были компании Sky Express («Скай Экспресс») и AviaNova («Авианова»), которые активно присутствовали в Уральском регионе. Их стратегия представлена традиционным «джентльменским набором» дискаунтера: продажей билетов через Интернет, отсутствием питания на борту, жестко закрепленными спинками кресел, отсутствием возможности поменять или сдать приобретенный билет и т. д. Эти неудобства стоят для потребителя в 3 раза меньше стандартного тарифа. Компания Sky Express была основана в марте 2006 г., а 31 октября 2011 г. Росавиация аннулировала сертификат авиаперевозчика с формулировкой «из-за ухудшения производственных показателей и финансово-экономического состояния деятельности эксплуатанта». По числу перевезенных пассажиров в 2009 г. компания занимала 13-е место по данным Федерального агентства воздушного транспорта (1,02 млн пассажиров). По итогам 9 месяцев 2011 г. она увеличила пассажирские перевозки на 10,5 % по сравнению с аналогичным периодом 2010 г. — до 942,3 тыс. человек.

Sky Express была первой российской низкобюджетной авиакомпанией, ее бизнес-модель не была скопирована с европейских лоукостеров, а разрабатывалась самостоятельно. Ввиду неподготовленности российского рынка к традиционным агрессивным моделям низкобюджетных авиаперевозок Sky Express сочетала в себе характерные черты как лоукостеров, так и традиционных авиакомпаний. К элементам низкобюджетной модели относились:

- однотипный флот из самолетов Boeing 737, что позволяет минимизировать затраты на техобслуживание и подготовку пилотов и бортпроводников;
 - одноклассная компоновка салона (экономкласс);
 - однотипная маршрутная сеть — протяженность от 700 км (Санкт-Петербург) до 1800 км (Тюмень), в которой отсутствуют региональные и дальнемагистральные линии;
 - интенсивное использование флота (налет на 1 воздушное судно составляет около 8 ч в день);
 - отсутствие трансферных (стыковочных) рейсов;
 - высокая занятость пассажирских кресел (76 % в январе — мае 2010 г.);
 - доминирование прямых каналов продаж (доля онлайн-продаж билетов на сайте авиакомпании составляет 65%).
- В бизнес-модель Sky Express входили элементы, не присущие низкобюджетным перевозчикам:
- бесплатный регистрируемый багаж (до 15 кг на 1 пассажира, включая ручную кладь), в то время как большинство низкобюджетных перевозчиков включают в билет бесплатно только ручную кладь до 10 кг;
 - отсутствие сбора за оплату банковской картой при покупке билета на сайте авиакомпании (у «Авиановы» сбор составляет 200 руб. за транзакцию), предоставление клиентам возможности оплатить билеты в салонах связи или электронными деньгами;
 - высокий возраст флота (в среднем 19 лет по состоянию на июль 2010 г.), что не позволяет достичь максимальной эффективности по затратам на топливо и техобслуживание;

- использование основных аэропортов в пунктах назначения (в России, как правило, отсутствуют второстепенные аэропорты).
- высокий уровень проникновения онлайн-сервисов, таких как покупка билетов на сайте авиакомпании, онлайн-регистрация на рейсы, выбор места в салоне самолета, заказ питания на борту и т. д.

«Авианова» — российская бюджетная авиакомпания, осуществлявшая свою деятельность в 2009-2011 гг. «Авианова» — проект российской инвестиционной компании «А1 Групп» (51%, входит в «Альфа-Групп») и американского инвестиционного фонда Indigo Partners (49%), который специализируется на подобных проектах. По состоянию на апрель 2011 г. парк авиакомпании состоял из 6 воздушных судов типа Airbus A320. Все самолеты взяты в лизинг и зарегистрированы в Ирландии. За весь период операционной деятельности услугами «Авиановы» воспользовались более 2,5 млн пассажиров. На начало октября 2011 г. «Авианова» была 12-й по величине авиакомпанией России и занимала 5-ю строчку в рейтинге крупнейших российских компаний по объему внутренних авиаперевозок.

В мировой практике основной лозунг лоукостеров «Безопасность пассажиров — превыше всего, остальное — неважно», поэтому эксплуатируются новые суда, требующие меньше затрат на обслуживание и ремонты. Для наших лоукостеров возраст судов — основная проблема (выше было указано, что, например, у «Скай Экспресс» средний возраст судов в июле

2010 г. составлял 19 лет). Еще одной существенной проблемой бизнеса лоукостеров, так необходимых российскому пассажиру, является то, что у нас нет второстепенных аэропортов, стоянка в которых могла бы быть значительно дешевле, и абсолютно отсутствует транспортная инфраструктура, которая позволила бы добраться из второстепенного аэропорта к месту назначения авиапассажира. Обе авиакомпании неоднократно подвергались критике за частые задержки своих рейсов.

Стратегию развития рынка отечественные авиакомпании, безусловно, используют на тех направлениях, которые для них доступны, и даже пытаются конкурировать по цене с западными авиакомпаниями. В процентном отношении зарубежных рейсов отечественных авиакомпаний в разы меньше, чем зарубежных рейсов западных авиакомпаний. Это объясняется неудовлетворительными техническими характеристиками отечественных самолетов (повышенной шумностью). Наши авиакомпании пока активно покоряют зарубежные авиарынки нерегулярными чартерными рейсами, в этом процессе успешно принимали участие и дискаунтеры.

Все существующие ныне стратегии развития российских авиакомпаний нацелены на использование возможностей «экономики масштаба» через централизацию собственности, что обеспечивает не столько минимизацию издержек, сколько доминирование на рынке; тем не менее существующие в мировой практике стратегии развития авиарынка — это наше будущее.

Литература

1. Джонсон Дж., Шоулз К., Уиттингтон Р. Корпоративная стратегия: теория и практика. М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 800 с.
2. Kogut B. Joint Ventures. Theoretical and Empirical Perspectives // *Strategic Management Journal*. 1988. Vol. 9. № 4. P. 319—332.
3. Kogut B. The Network as Knowledge: Generative Rules and the Emergence of Structure // *Strategic Management Journal*. 2000. Vol. 21. № 3. P. 405—425.
4. Das T.K., Teng Bing-Sheng. A Resource-based Theory of Strategic Alliances // *Journal of Management*. 2000. Vol. 26. № 1. P. 37—38.
5. Бобина М. Стратегические межфирменные альянсы // *Вопросы экономики*. 2002. № 4. С. 102—110.
6. Портер М. Международная конкуренция: пер. с англ. / Под ред. В.И. Щетинина. М. : Международные отношения, 1993. 896 с.
7. Сай В.М., Фомин В.К. Моделирование систем взаимоотношений железной дороги с хозяйствующими субъектами // *Транспорт Урала*. 2008. № 4 (19). С. 15—19.
8. Кузнецова Е.Ю., Скуратов К.С. Реструктуризация авиатранспортного комплекса на основе модели стратегического сотрудничества // *Транспорт Урала*. 2009. № 3 (22). С. 25—29.

References

1. Johnson Jerry, Shulz Kiven, Uittington Richard. *Korporativna strategija: teorija i praktika [Corporate strategy: theory and practice]*, 7-e izdanje: Per. s angl. M.: ООО «I.D. Vil'jams», 2007. 800 s.
2. Kogut B. Joint Ventures: Theoretical and Empirical Perspectives // *Strategic Management Journal*. 1988. vol. 9. № 4. p.319 – 332
3. Kogut B. The Network as Knowledge: Generative Rules and the Emergence of Structure // *Strategic Management Journal*. 2000. vol. 21. № 3. p. 405 – 425.
4. Das T.K., Teng Bing-Sheng. A Resource-based Theory of Strategic Alliances // *Journal of Management*. 2000. vol. 26. № 1. p. 37 – 38.
5. Bobina M. Strategicheskie mezhfirmennye aljansy [Strategic inter-company alliances] // *Voprosy jekonomiki*. 2002. № 4. S. 102 – 110.
6. Porter M. Mezhdunarodnaja konkurencija [International conference]: Per. s angl. / Red. V.I. Wetinina. M.: Mezhdunarodnye otnoshenija, 1993. 896 s.
7. Saj V.M., Fomin V.K. Modelirovanie sistem vzaimootnoshenij zheleznoj dorogi s hozjajstvujushchimi subjektami [Modeling of interaction systems between railways and business entities] // *Transport Urala*. 2008. № 4 (19). S. 15 – 19.
8. Kuznetsova E.Ju., Skuratov K.S. Restrukturizatsija aviatransportnogo kompleksa na osnove modeli strategicheskogo sotrudnichestva [Restructuring air-transport complex on the basis of strategic cooperation] // *Transport Urala*. 2009. № 3 (22). S. 25 – 29.

УДК 656.25:621.318

Адам Пантелеевич Разгонов, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

Борис Сергеевич Сергеев, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

Екатерина Ивановна Ящук, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

ЗАЩИТА РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Adam P. Razgonov - DSc, prof. of "Automatics, telemechanics and communication" department, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport in the name of V. Lazaryan

Boris S. Sergeev – DSc, prof. of "Electric machinery" department, The Ural State University of Railway Transport

Ekaterina I. Yashchuk – PhD student of "Automatics, telemechanics and communication" department, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport in the name of V. Lazaryan

Protection Of Track Circuits By Application Of Parametric Transformer

Аннотация

Приведены результаты испытания разработанного преобразователя частоты ПЧ 50:50-300. Разработана его математическая модель и исследованы основные характеристики. Установлено, что подобный преобразователь может быть использован в качестве защитного устройства в системах железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: параметрический трансформатор, защитные свойства, мощная импульсная помеха, рельсовые цепи.

Annotation

The results of developed frequency shifter PCH 50:50-300 testing are considered in the article. The mathematical model of it has been made and its basic characteristics have been researched. It has been determined that PCH 50:50-300 can be used as protector in systems of railway automation and telemechanics.

Key words: parametric transformer, protective qualities, intense impulse interference, track circuit.

С внедрением скоростного движения повышаются требования к обеспечению безопасности. Курс на замену устройств и систем автоматики и телемеханики на более прогрессивные является определяющим. Существует ряд устройств и систем, которые, как показывает статистика, часто отказывают. Это защитные средства (ЗС) — разрядники, варисторы, выравниватели и др., которые на участках дорог с активными грозовыми зонами не отвечают требованиям по тепловым характеристикам и чьи сбои в работе сопровождаются отказами аппаратуры СЦБ. Известно большое множество защитных устройств (ЗУ), среди них ЗУ на базе сильноточных разрядников, ограничителей перенапряжений, трансформаторов и т. п. [1]. Некоторые устройства защиты строятся на концепции равнозначной защищенности от импульсных помех всех входных каналов их поступления, начиная от путевого ящика и вводов электропитания автоблокировки [2, 3]. Такая концепция требует существенных технических и экономических затрат, и ее реализация, на наш взгляд, неприемлема в первую очередь для защиты входных силовых устройств, поскольку в других случаях применения такой защиты следует учитывать вероятностные нормативы поражения защищаемого объекта, не считая трудностей его возможного восстановления.

Согласно исследованиям, при ударах молнии амплитуда тока и напряжения помех в кабелях, ведущих к релейным шкафам и щитовым установкам систем автоматики и телемеханики, может достигать 8 кА и 4,5 кВ с фронтом импульса 2 мкс и длительностью 210 мкс. При этом энергия мощной импульсной помехи (Джоулев интеграл $\int i^2 dt$) превышает 30 кДж (разрядник РВНШ-250 имеет интеграл ~2,5 кДж) [2].

Поэтому появляется актуальная проблема грозозащиты, в основе которой лежит совершенствование ЗС. Одним из решений этой проблемы является создание эффективного источника вторичного электропитания для индивидуальной защиты — параметрического генератора, работающего в режиме по-

вторения частоты и обладающего определенными защитными свойствами. Такой генератор подавляет проникновение помех в аппаратуру наравне с использованием его для питания и защиты электронной техники, в частности для тональных релейных цепей, внедрение которых на дорогах ускоренно расширяется.

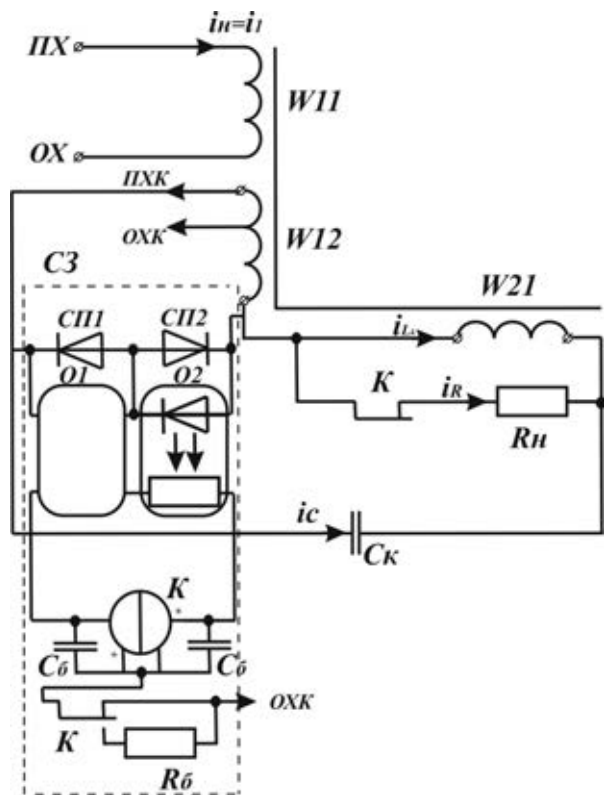


Рисунок 1— Принципиальная схема ПЧ 50:50-300

В настоящее время на сети железных дорог стран СНГ широко применяется параметрический генератор частоты 25 Гц (ПЧ 50:25). Более чем 50-летний опыт эксплуатации этих вторичных источников питания показал [1], что наряду с высокими стабилизацией и фильтрацией выходного напряжения, автоматическим выключением нагрузки при ее коротком замыкании, высоким КПД и др. они могут обладать эффективным защитным свойством — практически полностью подавляют мощные импульсные помехи (МИП), создаваемые грозовыми разрядами и коммутационными электромагнитными процессами в тяговой сети. Это объясняется следующими факторами: изображающая точка взаимодействующих магнитных потоков сердечников располагается на нелинейном участке кривой намагничивания, а в преобразователях частоты с неколлинеарными магнитными полями, кроме того, благодаря размещению обмоток под углом 90° принципиально исключается трансформация тока помех в нагрузку.

Рассмотрим преобразователь ПЧ 50:25 как базовый элемент для построения на его основе различных устройств, выступающих в качестве вторичных источников питания и до-

полнительно выполняющих функции защиты от перегрузок и перенапряжений.

Авторами разработан подобный преобразователь частоты ПЧ 50:50 (рис. 1), располагаемый, в частности, в релейных шкафах автоблокировки или на посту электрической централизации.

Для него функционирование схемы определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} i_{L_k} + i_R + i_2 &= 0, (i_2 = i_{C_k}) \\ i_1 \cdot W_{11} + i_2 \cdot W_{12} &= h_1 \cdot l, \\ i_{L_k} \cdot W_{21} &= h_2 \cdot l, i_{L_k} = \frac{h_2}{W_{21}} \cdot l, \\ i_{C_k} &= CSW_{12} \frac{d^2 b_1}{dt^2} + CSW_{21} \frac{d^2 b_2}{dt^2}, \\ i_R &= \frac{SW_{21}}{R_y} \frac{db_2}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

где h_1, h_2 — напряженности поля на участке магнитопровода l сечением S .

Процессы в резонансном контуре после несложных преобразований системы уравнений (1) можно представить нелинейным дифференциальным уравнением 2-го порядка

$$\frac{d^2}{dt^2}(b_2 + k_{oc}b_1) + \frac{db_2}{dt}(\frac{1}{R_u \cdot C} + \frac{l}{RCW_{21}^2}h_2) = 0 \quad (2)$$

где $k_{oc} = \frac{W_{12}}{W_{21}}$ — коэффициент обратной связи;

R_n — сопротивление нагрузки.

При составлении (1) принято, что **потери на гистерезис и активные** сопротивления обмоток трансформатора пренебрежимо малы. Аппроксимируем кривую намагничивания $b(h)$ магнитопровода уравнением вида

$$h = \alpha sh \beta b, \quad (3)$$

где α, β — коэффициенты аппроксимации ($\alpha=2,41$ А/м, $\beta=4,1$ 1/Тл, сталь марки 2412, холоднокатаная, изотропная).

Приведем (2) с учетом (3) путем умножения всех членов на β и введением обозначений $t = \frac{\tau}{\omega}$, $\delta = \frac{1}{R_n C \omega}$, $\frac{1}{k} = \frac{W_{21}^2 SC \omega}{R_n C}$ к безразмерному виду

$$\frac{d^2}{d\tau^2}(\beta b_2 + k_{oc}\beta b_1) + \frac{d\beta b_2}{d\tau} \cdot \delta + \frac{1}{k} \cdot sh\beta b_2 = 0. \quad (4)$$

Нелинейное дифференциальное уравнение (4) позволяет рассчитать основные амплитудно-фазовые характеристики, в частности, определить амплитуды первой гармоники индукций входной и выходной обмоток. Заметим, что генераторы, работающие в режиме повторения частоты, малоисследованы и для аналитического получения их характеристик требуется выполнение достаточно сложных и трудоемких аналитических преобразований.

Для отыскания более простого решения (4) используем асимптотический метод Крылова — Боголюбова, позволяющий получить требуемые параметры.

При разработке и оптимизации конструкции и схемы генератора важно оценить значение амплитуд первой гармоники индукций на границах неустойчивости решения (4). Поэтому подробнее остановимся на поиске условий неустойчивости (4) в процессе возникновения генерации частоты 50 Гц.

Будем считать, что при отсутствии колебаний индукции имеем $b_1 \approx b_2$, что позволяет ввести малое возмущение $\Delta b = b_1 - b_2$ и, используя известный метод [4], свести дифференциальное уравнение для приращений к линейному уравнению с переменными во времени коэффициентами

$$\frac{d^2 \Delta b}{d\tau^2} + 2\delta \frac{d\Delta b}{d\tau} + \frac{1}{k} sh\beta b = 0. \quad (5)$$

Далее подстановкой $\Delta b = \eta \cdot e^{-\delta \cdot \tau}$ и исключением первой производной выражение (5) приведем к достаточно хорошо исследованному уравнению Хилла [4, 5]

$$\ddot{\eta} + (-\delta^2 + \frac{1}{k} sh\beta b) \eta = 0. \quad (6)$$

Согласно [4], уравнение границ области неустойчивости решения (6) по первому приближению имеет вид

$$(\Psi_0 - n^2)^2 + 2(\Psi_0 + n^2) \cdot \delta^2 + \delta^4 = \Psi_n^2. \quad (7)$$

где n — номер области неустойчивости.

Представляет интерес процесс возникновения колебаний с частотой ω — второй области неустойчивости $n=2, \Psi_n = \Psi_2$.

Для этого определим амплитуду основной гармоники индукции накачки, принимая закон изменения индукции

$b_1 = B_{1m} \sin \tau$ и разлагая коэффициент $\frac{1}{k} sh\beta b$ в ряд Фурье.

Тогда (6) запишется в виде

$$\frac{d^2 \eta}{d\tau^2} + \frac{2}{k} (-jJ_1(jX_m) \sin \tau - J_3(jX_m) \sin 3\tau \dots) \eta = 0, \quad (8)$$

где $-jJ_1(jX_m) \sin \tau - J_3(jX_m) \sin 3\tau + \dots$ — функции Бесселя от мнимого аргумента 1 третьего порядка, $X_m = \beta \cdot B_{1m}$.

Отбросив во втором слагаемом выражения (8) составляющие с частотами выше третьей гармоники и считая, что $\delta=0$ (режим холостого хода) и $\Psi_0=0$, из (7) получим уравнение границы области неустойчивости

$$-jJ_1(j\beta B_{1m}) = 2k. \quad (9)$$

Уравнение (9) решается графически. Задаваясь значением расчетного коэффициента K , определяем соответствующую ему величину индукции B_{1m} (рис. 2).

Опытный образец ПЧ 50:50-300 имеет следующие параметры: $S=20,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, k=140, l_{cp}=0,34 \text{ м}, W_{21}=310, C=25 \cdot 10^{-6} \text{ мкФ}, k_{oc}=0,6 \dots 0,8$.

Определим амплитуду стационарных колебаний контура частотой 50 Гц при допущениях, сделанных выше. Известно

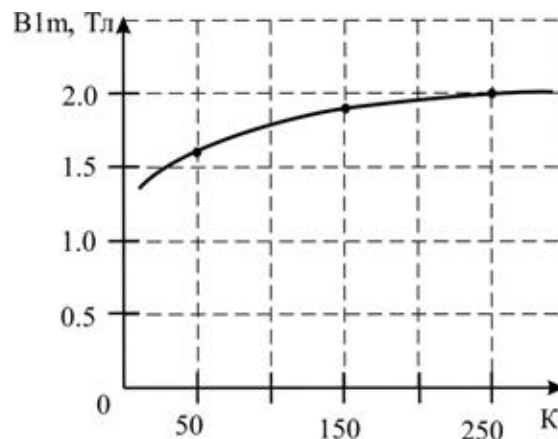


Рисунок 2 — Зависимость индукции накачки от коэффициента K

[4, 6], что амплитуда индукции выходных колебаний определяется при условии равенства средней за период T частоты колебательного контура и резонансной частоты, т. е. $\omega_{cp} \approx \omega$.

Выразим среднюю собственную частоту контура через магнитные параметры и параметры системы в виде

$$\omega_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{dt}{\sqrt{L(t)C}}, \quad (10)$$

где $L(t)$ — мгновенное значение индуктивности, зависящее от всех намагничивающих сил (1).

Мгновенная свободная частота с учетом (3) выражается

$$\omega(t) = \sqrt{\frac{l_{cp}}{\mu S W_{21}^2 C}}, \quad (11)$$

где $\frac{1}{\mu} = \alpha \beta ch\beta b$, $\omega(t) = 290 \frac{1}{c}$ (в образце ПГ).

Примем, что $B_1=0$, а индукцию контура запишем в виде $b = B_{2m} \cos t$ и подставим в (11). При разложении $ch\beta b$ в ряд Фурье учтем только два первых слагаемых

$$\frac{1}{\mu} = \alpha \beta J_0(j\beta B_{2m}) + 2\alpha \beta J_2(j\beta B_{2m}) \cos 2\omega t.$$

В результате формула (10) с учетом (11) и разложения в ряд $ch\beta b$ приобретает вид

$$\omega_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{dt}{\sqrt{\frac{l_{cp}}{\mu S W_{21}^2 C} (J_0(j\beta B_{2m}) + 2J_2(j\beta B_{2m}))}}. \quad (12)$$

Интеграл (12) сводится к эллиптическому, и для средней собственной частоты он записывается в виде

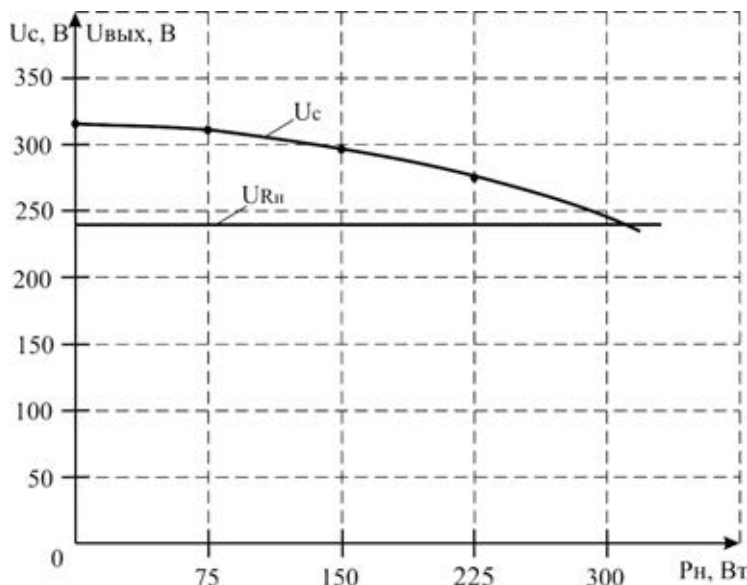


Рисунок 3 — Внешняя характеристика ПЧ 50:50-300

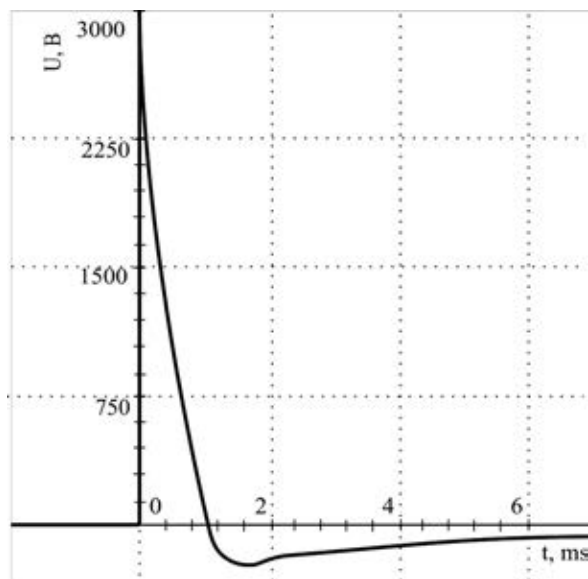


Рисунок 4 — Осциллограмма МИП на входе ПЧ 50:50

$$\omega_{cp} = \sqrt{\frac{\alpha \beta I_{cp}}{SW_{21}^2 C} (J_0(j\beta B_{2m}) + 2J_2(j\beta B_{2m})) \frac{2}{\pi} E}, \quad (13)$$

где E — полный эллиптический интеграл второго рода с модулем [5]

$$r^2 = \frac{4J_2(j\beta B_{2m})}{(J_0(j\beta B_{2m}) + 2J_2(j\beta B_{2m}))}.$$

В формуле (13) учтено, что функция Бесселя второго порядка от мнимого аргумента отрицательна.

Подставим (13) в (10) и поделим обе части формулы на ω , тогда получим уравнения для определения βB_{2m}

$$[J_0(j\beta B_{2m}) + 2J_2(j\beta B_{2m})] \left(\frac{2E}{\pi} \right)^2 = k. \quad (14)$$

При реальных расчетах значения аргумента лежат в области $\beta B_{2m} \geq 4,8$. Тогда модуль эллиптического интеграла оказывается больше единицы (1,05—1,24) из-за ограниченного учета числа членов при разложении (11). Отсюда можно предположить, что точные значения модуля близки к единице, т. е. $E = 1$.

Решая графически (14) и зная конструктивный коэффициент $k \approx 125$ —165, находим индукцию контурной обмотки, использованную для выбора параметров генератора (при $B_{max} = 1,8$ Тл).

Рассмотрим внешнюю характеристику экспериментального образца генератора с обратной связью (рис. 3). Видно, что характеристика является довольно жесткой, выходное напряжение с ростом нагрузки весьма стабильное. Здесь, очевидно, сказывается факт передачи части энергии с входа на выход через обмотку обратной связи. Коэффициент стабилизации напряжения достигает 60, коэффициент гармоник составляет менее 8%, КПД превышает 0,8 при $\cos \varphi \approx 0,76$. Столь высокие энергетические показатели генератора достигнуты при исполь-

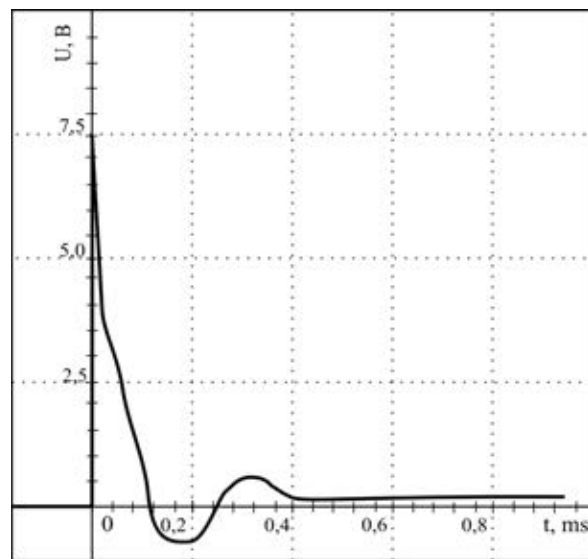


Рисунок 5 — Осциллограмма МИП на выходе ПЧ 50:50

зовании стали 2412, изготовленной Новолипецким металлургическим комбинатом.

Недостатком ПЧ 50:50, работающем в режиме повторения частоты, является проникновение импульсной помехи по каналу обратной связи в нагрузку, что недопустимо.

На рис. 1 пунктиром представлена схема защиты нагрузки генератора от импульсной помехи. Схема содержит супрессоры СП1, СП2, резистивные оптроны О1, О2 и контрольное реле К. Динамические характеристики сильноточных супрессоров по времени срабатывания (НС) почти на 2—3 порядка меньше, чем у оптронов, диодов и транзисторов. Это позволяет с помощью СП1, СП2 зашунтировать МИП раньше, чем помеха попадет в схему защиты и в нагрузку. Параметры

супрессоров выбраны с учетом рассеяния энергии помехи, а напряжение их срабатывания не должно превышать уровень стационарного напряжения на обмотке обратной связи более чем на 15%.

Испытания показали, что возможные повреждения элементов схемы защиты контролируются реле К, отключающим нагрузку при любых отказах, т. е. схема отвечает требованиям, предъявляемым к приборам первого класса надежности.

На рис. 4 и 5 представлены экспериментальные осциллограммы МИП. Из них следует, что максимальная амплитуда МИП на обмотке ОС ≈ 800 В, а при включении схемы защиты — 100 В (порог срабатывания супрессоров).

Разработаны другие варианты схем генераторов на нелинейных магнитных полях, работающих в режиме повторения частоты. Их схемы не содержат электрической связи «вход-выход» и отвечают требованиям к устройствам, практически полностью подавляющим помехи для аппаратуры питания тональных рельсовых цепей [3]. На базе рассмотренного генератора (см. рис. 1) разработан генератор частоты 1:1, отвечающий нормативным требованиям защиты от МИП.

В заключение отметим, что проблема защиты электронной аппаратуры СЦБ, размещенной в релейных шкафах, от помех успешно решается на базе индивидуальной последней ступени защиты — параметрических генераторов частоты на нелинейных магнитных полях.

Литература

1. Талыков А.А., Разгонов А.П. Фазочувствительные рельсовые цепи 25 Гц. М. : Транспорт, 1972. 96 с.
2. Костроминов А.М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех. М. : Транспорт, 1997. 192 с.
3. Сухоруков С.А. Вводно-защитные устройства для микропроцессорной автоблокировки // Автоматика, связь, информатика. 2009. № 9. С. 15—18.
4. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. М. : Мир, 1968. 300 с.
5. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. М. : Высшая школа, 1977. 343 с.
6. Задерей Г.П., Пунтус В.И. Параметрический трансформатор с ортогональными полями // Электронная техника. 1972. № 2. С. 43—48.

References

1. Talykov A. A., Razgonov A. P. Fazochuvstvitelnye rels-ovye tsepi 25 Gts [Phase-sensitive track circuit of 25 hertz]. M.: Transport, 1972. 96 s.
2. Kostrominov A. M. Zashchita ustroystv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki ot pomekh [Protection of railway automatics and telemechanics devices against interferences]. M.: Transport, 1997. 192 s.
3. Sukhorukov S. A. Vvodno-zashchitnye ustrojstva dlja mikroprotsessornoj avtoblokirovki [Input-protector devices for microprocessor automatic block system] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2009. №9. S. 15 – 18.
4. Tikhro Hayasi. Nelinejnye kolebanija v fizicheskikh sistemah [Nonlinear oscillations in physical systems]. M.: Mir, 1968. 300 s.
5. Bessonov L. A. Nelinejnye elektricheskie tsepi [Nonlinear electric circuit]. M.: Vysshaja shkola, 1977. 343 s.
6. Zaderei G. P., Puntus V. I. Parametricheskij transformator s ortogonalnymi poljami [Parametric transformer with orthogonal fields] // Elektronnaja tekhnika. 1972. № 2 . S. 43 – 48.

УДК 656.259.3, 51.74

Игорь Васильевич Беляков, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Московского государственного университета путей сообщения, Москва

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ ПО ФИШЕРУ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА АНТИМОДАЛЬНОСТИ КВАЗИДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПОМЕХ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

Igor V. Belyakov, DSc, prof., "Railway Automation and Telemechanics" department, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow

Estimate Of Fisher Information Amount On The Antimodality Coefficient Of Quasideterministic Disturbances Of Railway Lines

Аннотация

Рассмотрена теоретическая оценка информационного количества информации по Фишеру для квазидетерминированного негауссовского случайного процесса, описываемого бимодальной функцией плотности распределения вероятностей.

Ключевые слова:

информационное количество информации по Фишеру, негауссовские помехи, бимодальное распределение помех, помехи в системах контроля состояния рельсовых линий.

Annotation

Theoretical estimate of Fisher information amount for quasideterministic of non-Gaussian process described by bimodal function of probability coefficient distribution is made.

Key words:

information amount of Fisher information, non-Gaussian disturbances, bimodal disturbances distribution. Disturbances in systems of state control of railway lines.

На электрифицированных участках железных дорог помехи в нестандартных каналах связи систем контроля состояний рельсовых линий (КРЛ) обусловлены токами тяговой сети, потребляемыми электроподвижным составом. Анализ статистической структуры мешающих сигналов показал, что они представляют совокупность флуктуационной и квазидетерминированной составляющих. Флуктуационная составляющая помехи формируется токами большого количества одновременно подключенных и случайным образом расположенных на подстанционной зоне, не связанных между собой потребителей электроэнергии. Примерами случайной составляющей являются мешающие сигналы, создаваемые токами электроподвижного состава (ЭПС), удаленными от места подключения приемника КРЛ или утечками тока через изоляторы контактной сети; помехи от наведенных ЭДС и др. Как правило, флуктуационный шум с достаточной для практических расчетов точностью описывается гауссовским распределением и имеет небольшой (до нескольких десятков секунд) интервал корреляции. Спектральная плотность случайной составляющей помех имеет узкополосный выброс в области 50 Гц и равномерна в диапазоне высоких частот. Квазидетерминированная (регулярная) составляющая создается мощным источником помех, локализованным в пространстве. Такого рода мешающие сигналы создаются, например, тяговым током электроподвижного состава, находящегося в пределах блок-участка, помехами от передатчиков систем контроля состояния рельсовой линии смежных либо соседних блок-участков и др.

Физические процессы в источниках квазидетерминированных помех имеют стохастическую природу, и поэтому мешающие сигналы, как правило, являются сильнокоррелированными и существенно негауссовскими. Спектральная плот-

ность таких помех содержит ярко выраженные всплески на частотах, кратных промышленной частоте тягового тока.

Соотношение между регулярной и случайной составляющими мешающих сигналов оценивается коэффициентом антимодальности, равным частному от деления дисперсий этих составляющих $C_d^2 = D_p / D$.

Эффективность оптимальной статистической обработки сигналов на фоне негауссовских помех особенно сильно проявляется при больших значениях коэффициента антимодальности C_d^2 (в случае значительной регулярной составляющей помех). В частности, асимптотически оптимальные (АО) алгоритмы обнаружения в аддитивной смеси $y(t) = S[\lambda(t), t] + n(t)$ слабого сигнала $S[\lambda(t), t]$ на фоне негауссовских помех $n(t)$ представляют нелинейное преобразование, однозначно связанное с одномерной плотностью вероятностей их распределения $W_n(n)$

$$Z(n) = -\frac{\partial \ln W_n(n)}{\partial n}$$

выполняемое до согласованной фильтрации либо корреляционной обработки.

Асимптотически оптимальные алгоритмы обнаружения слабого сигнала теоретически обеспечивают вероятность ошибки, стремящейся к нулю при увеличении отношения мощности квазидетерминированной составляющей помех к дисперсии их случайной составляющей $C_d^2 \rightarrow \infty$. Известно, что для АО-алгоритмов вероятность ошибки при достаточно большом объеме выборки N полностью определяется распределением асимптотически достаточной статистики [1]

$$q(\lambda) = \sum_{h=1}^H S[\lambda(t_h), t_h] \cdot Z(y_h)$$

которая асимптотически нормальна при $H \rightarrow \infty$.

Среднее значение и дисперсия асимптотически достаточной статистики зависит от количества информации по Фишеру $I_{\Phi n1}$ о помехе с одномерным распределением $W_n(n)$

$$I_{\Phi n1} = M \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial n} \ln W_n(n) \right]^2 \right\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\partial}{\partial n} \ln W_n(n) \right]^2 \cdot W_n(n) dn. \quad (1)$$

В работе [1] показано, что вероятность ошибки приближенно будет определяться следующим выражением:

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(P_c \cdot H \cdot \sqrt{\frac{I_{\Phi n1}}{2}} \right),$$

где P_c — средняя мощность сигнала, $\operatorname{erfc}(q) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_q^{+\infty} \exp\{-t^2\} dt$.

Из анализа приведенного выражения следует, что с ростом информационного количества по Фишеру вероятность ошибки монотонно убывает до нуля. Таким образом, анализ эффективности АО-алгоритмов обработки полезных сигналов на фоне помех с негауссовским распределением сводится к анализу величины $I_{\Phi n1}$.

Рассмотрим зависимость количества информации по Фишеру относительно помех, представляющих сумму квазидетерминированной и случайной составляющих, плотность распределения вероятностей мгновенных значений которых описывается следующим выражением:

$$W_n(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \exp \left\{ -\frac{n^2 + D_p}{2D} \right\} \times \left[\sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m (-1)^m \cdot I_m \left(\frac{D_p}{2D} \right) \cdot I_{2m} \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right) \right],$$

где $\varepsilon_m = 1$ при $m=0$;

$\varepsilon_m = 2$ при $m>0$.

Согласно выражению (1), зависимость информационного количества по Фишеру от коэффициента антимодальности

$C_{\lambda}^2 = \frac{D_p}{D}$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} I_{\Phi n1} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\partial}{\partial n} \ln W_n(n) \right]^2 \cdot W_n(n) dn = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{n^2}{D} \cdot W_n(n) dn - \frac{2}{D^2} \sqrt{\frac{C_{\lambda}^2}{\pi}} \exp \left\{ -\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right\} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \int_{-\infty}^{+\infty} n \cdot \exp \left\{ -\frac{n^2}{2D} \right\} \times \left\{ I_0 \left(\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right) \cdot I_1 \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right) + \right. \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \cdot I_m \left(\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right) \times \left[I_{2m+1} \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right) + I_{2m-1} \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right) \right] \left. \right\} dn + \\ &+ \frac{\sqrt{2} \cdot C_{\lambda}^2}{D \sqrt{\pi D}} \exp \left\{ -\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right\} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left\{ -\frac{n^2}{2D} \right\} \times \\ &\times \frac{I_0 \left(\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right) I_1 \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right) + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m I_m \left(\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right) \cdot \left[I_{2m+1} \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right) + I_{2m-1} \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right) \right]}{I_0 \left(\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right) \cdot I_0 \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right) + 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \cdot I_m \left(\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right) \cdot I_{2m} \left(\frac{\sqrt{2D_p}}{D} n \right)} dn = \\ &= J_1 + J_2 + J_3. \quad (2) \end{aligned}$$

Первый интеграл J_1 в выражении (2) является табличным. Он равен

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{2}{D \sqrt{\pi}} \exp \left\{ -\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right\} \times \\ &\times \left[\sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m (-1)^m \cdot I_m \left(\frac{C_{\lambda}^2}{2} \right) \cdot \frac{\Gamma \left(m + \frac{3}{2} \right)}{\Gamma(2m+1)} \cdot C_{\lambda}^{2m} \cdot {}_1F_1 \left(m + \frac{3}{2}; 2m+1; C_{\lambda}^2 \right) \right], \end{aligned}$$

где ${}_1F_1(a, b, c)$ — вырожденная гипергеометрическая функция [2].

Второй интеграл J_2 равен нулю, поскольку подынтегральное выражение является нечетной функцией аргумента n . Третий интеграл J_3 в аналитическом виде через известные функции не выражается. Оценки подынтегрального выражения J_3 для наиболее характерных значений параметра C_{λ}^2 табулированы.

Результаты расчетов, проведенных для двух значений дисперсии случайной составляющей $D=0,1$ и $D=0,2$ показали, что по мере возрастания мощности регулярной составляющей $C_{\lambda}^2 \rightarrow \infty$ информационное количество по Фишеру относительно негауссовских помех неограниченно увеличивается. Следовательно, эффективность квазиоптимальной нелинейной обработки сигналов будет расти.

Литература

1. Фомин А.Ф., Хорошавин А.Н., Шелухин О.И. Аналоговые и цифровые синхронно-фазовые измерители и демодуляторы. М.: Радио и связь, 1987. 248 с.
2. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, 1971. 1108 с.

References

1. Fomin A.F., Khoroshavin A.N., Shelukhin O.I. Analogovye i tsifrovye sinkhronno-fazovye izmeriteli i demodulyatory [Analog and digital synchro-phase meters and demodulators]. M.: Radio i svjaz, 1987. 248 s.
2. Gradshtein I.S., Ryzhik I.M. Tablitsy integralov, summ, rjadov i proizvedenij [Integral tables, sums, series and products]. M.: Nauka, 1971. 1108 s.

УДК 62-97/-98

Бирюков Александр Петрович, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)

НОРМИРОВАНИЕ ДЛИН ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ ПРОВОДНИКОВ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЦЕНТРАЛИЗАЦИЯХ СТРЕЛОК И СВЕТОФОРОВ

Alexander P. Biryukov, PhD student of "Electric coupling" Petersburg State Transport University

Norms Of Grounding Conductors' Lengths In Microprocessor Interlocked Switch And Traffic Lights

Аннотация

Системы железнодорожной автоматики и телемеханики обладают высокой концентрацией аппаратуры, устанавливаемой со специальными устройствами защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП). Однако эффективность последних во многом зависит от места их установки и топологии прокладки защитных линий. В применяемой проектной документации не приводятся требования к длине таких линий. Статья посвящена выработке метода расчета максимальной длины защитных проводников с учетом процессов, происходящих в них при срабатывании УЗИП от импульсов, вызванных молниевыми перенапряжениями.

Ключевые слова: защитный проводник, контур заземления, разность потенциалов, молниевые импульсные перенапряжения, индуктивность.

Annotation

Systems of railway automatics and telemechanics possess high concentration of the equipment installed with special devices of protection against impulse overvoltages. However efficiency of the latter depends mainly on a place of their setting and topology of track protective plotting. In the project documentation the requirements to length of such lines are not given. The article is devoted to framing of a method for the maximum length calculation of protective explorers with regard to processes happening in them at protection devices impulse overvoltage, caused by lightning overvoltages.

Key words: Protective explorer, ground loop, potential difference, lightning impulse overvoltages, inductance.

Введение

Посты электрической централизации (ЭЦ) (либо транспортные модули) устройств железнодорожной автоматики и телемеханики обладают наиболее высокой концентрацией дорогостоящей релейной и микропроцессорной аппаратуры. Практика показывает, что они весьма уязвимы к воздействию молниевых и коммутационных перенапряжений. При этом необходимо отметить, что прямому удару молнии могут подвергаться светофоры, рельсовая линия, комплектные трансформаторные подстанции (КТП), а также непосредственно здания постов ЭЦ, имеющих общий контур заземления для всех устройств и всех областей его использования (молниезащита, электробезопасность). Прямой удар молнии в здание поста представляется наиболее опасным с точки зрения высоких уровней потенциалов на контуре заземления поста и соединенных с ним микропроцессорных устройствах (МПУ), а также энергии молниевых импульсов, распределяемой по этим цепям.

При установке на окончаниях цепей кабельных сетей устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) предполагается соединение этих устройств с контуром заземления поста, объединенного по применяемым техническим решениям с контуром молниезащиты. Следствием такого решения является возникновение пути поражения МПУ из цепи заземления поста при прямом ударе молнии. Потенциал на портах устройств МПУ будет определяться импульсным сопротивлением заземлителя молниезащиты, а энергия молнии будет перераспределена между этим заземлением и всеми радиально отходящими от места ввода импульсных линий связи, СЦБ и электропитания. В связи с этим возникает задача определения наиболее эффективной топологии цепей заземления с целью предотвращения появления критичных перенапряжений на МПУ.

Очевидно, необходимо иметь данные о максимально возможном безопасном потенциале на портах устройств МПУ. Электрическая прочность рабочих цепей МПУ относительно заземляемого корпуса обычно не превышает 2 кВ, что и можно задать в качестве норматива.

Определение длины заземляющих проводников МПУ

На рис. 1 представлена система молниезащиты постов ЭЦ, состоящая из УЗИП, защитного заземления и защитных проводников, объединенных контуром заземления поста.

35

Январь – Март

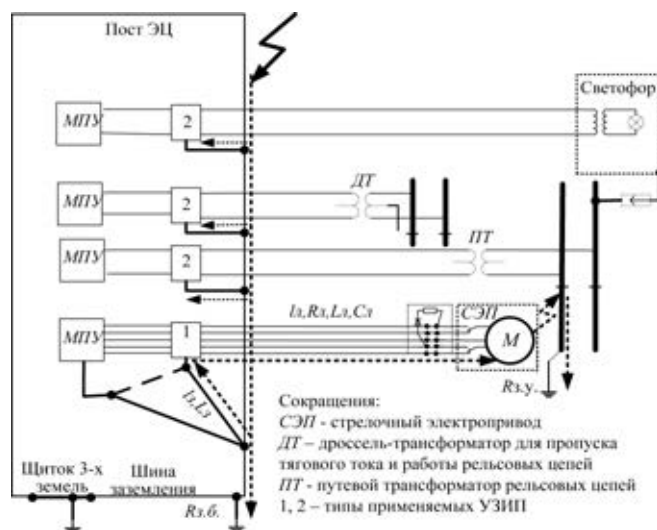


Рисунок 1 — Система молниезащиты постов ЭЦ, состоящая из УЗИП, защитного заземления и защитных проводников, объединенных контуром заземления поста

УЗИП устанавливаются на все порты, содержащие полупроводниковые элементы, с учетом жесткой электромагнитной обстановки в цепях, имеющих связь с напольными объектами. Перенапряжения «провод — провод» в защищаемых цепях сглаживаются соответствующими элементами УЗИП, выбираемыми по требованиям к цепи. Удар молнии в контур заземления поста приводит в первую очередь к появлению перенапряжений «земля — провод». После срабатывания УЗИП, стоящего в цепи «земля — провод», высокий потенциал появляется на порту МПУ. Ток импульса молнии перераспределяется по линиям связи напольных объектов (стрелок, сигналов, рельсовых цепей и пр.) и стремится к рельсам, имеющим высокую концентрацию свободных носителей заряда. При прохождении импульса тока по защитному проводнику, соединяющему УЗИП с шиной заземления, на нем появится разность потенциалов, определяемая его комплексным сопротивлением и характеристикой импульса (прежде всего фронта). Необходимо определить такую длину l_3 проводника (см. рис. 1), при которой разность потенциалов между портом с УЗИП и корпусом, соединенным с шиной заземления, не превысит принятого норматива 2 кВ.

Для определения проектного норматива защитного проводника l_3 рассчитаем максимально допустимую его длину от УЗИП до точки на шине заземления, эквипотенциальной с корпусом МПУ. Пренебрегая активным сопротивлением проводника и учитывая максимально возможное падение напряжения $\Delta U = 2$ кВ на его индуктивном сопротивлении, рассчитаем максимально возможную индуктивность при протекании импульса тока, вызванного ударом молнии в пост ЭЦ,

$$L = \Delta U / di/dt. \quad (1)$$

Для определения параметра di/dt рассмотрим импульс тока с амплитудой 10 кА [1] и определим крутизну изменения тока с учетом параметров линии связи ($R_{3.у}$, L_3) и сопротивления заземления на удаленном конце $R_{3.б}$.

Допустим, $R_3 = 2$ Ом, $L_3 = 120 \cdot 10^{-6}$ Гн для кабельной линии длиной 100 м, а $R_{3.у} = 50$ Ом. Тогда постоянная времени цепи составит

$$\tau = L_3 / (R_3 + R_{3.у}) = 120 \cdot 10^{-6} / 52 = 2,3 \text{ мкс}$$

Для упрощения расчетов (без потери содержательного смысла задачи) будем считать пренебрежимо малой длительность фронта импульса тока, поскольку в наихудшем случае она может быть на порядок меньше полученной постоянной времени.

Аппроксимируя кривую возрастания тока на промежутке времени с наибольшей крутизной di/dt от 0 до τ линейной зависимостью, получим возрастание импульса тока до $0,63I = 6,3$ кА [2] за время 2,3 мкс, откуда $di/dt = 6,3/2,3 = 2,7$ кА/мкс.

Далее подставляем полученное значение в (1)

$$L = \Delta U / di/dt = 2 \cdot 10^3 / (2,7 \cdot 10^3 / 10^{-6}) = 0,74 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Максимальную длину защитного проводника вычисляем с учетом его погонной индуктивности около $1,2$ мкГн/м [2]

$$l_3 = 0,74 \cdot 10^{-6} / 1,2 \cdot 10^{-6} \approx 0,62 \text{ м.}$$

Определение тока, ответвляемого в кабельную линию

В связи с изложенным выше приобретает актуальность задача оценки тока, ответвляемого в кабельную линию. Для ее решения будем моделировать кабельную линию цепочкой, состоящей из последовательно включенных индуктивности линии и емкости линия — земля. При этом емкость шунтируется сопротивлением $R_{3.у}$. Такая модель жилы будет достаточно адекватной при условии, что длина линии составляет десятки метров, а фронт импульса не менее единиц микросекунд. Это связано с тем, что за 1 мкс электромагнитная волна пробежит по линии менее 300 м. Этого достаточно для рассмотрения линии как элемента с сосредоточенными параметрами. Также будем использовать в расчетах характеристики заземлителя поста ЭЦ (с сопротивлением $R_{3.б}$), определяющие их поведение при возникновении ионизационных процессов [3]

При расчетах используются следующие данные:

- погонная емкость линия — земля $0,25$ нФ/м;
- погонная индуктивность линии $1,2$ мкГн/м;
- активное сопротивление линии не учитывается (оно на несколько порядков меньше сопротивления заземления на удаленном конце жилы);
- постоянная ионизации грунта $T_1 = 1,5$ мкс;
- постоянная деионизации грунта $T_2 = 1$ мкс;
- длительность импульса $T = 50$ мкс;
- критическая напряженность поля в грунте $E_{кр} = 10$ кВ/м;
- удельное сопротивление грунта 100 Ом·м.

При расчетах полагаем, что к линии прикладывается напряжение, равное разности напряжений на заземлителе поста ЭЦ и в точке заземления линии на удаленном конце. Заземлитель поста ЭЦ рассматривается как источник напряжения. Для упрощения расчетов (без потери содержательного смысла задачи) будем считать пренебрежимо малой длительность фронта импульса тока. Это предположение только увеличит рассчитанный ток, так как при мгновенном нарастании тока искровые процессы еще не развились и сопротивление заземления сравнительно велико. Импульс напряжения, приложенного к жиле, описывается формулой

$$\varphi(t) = \frac{I_0 \rho_0}{2\pi r_{сп}} \left(\left(\frac{r_{сп}}{r_0} - 1 \right) \cdot \exp(-t/T_1) + A \exp(-t/2T) + B \exp(-2t/T) \right) -$$

$$-\frac{I_0 \rho_0}{2\pi l_a} \exp(-t/T), \quad (2)$$

$$\text{где } A = \frac{2}{3} - \frac{T_2}{2T + T_2} + \frac{T_2}{2T + 3T_2}; \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{3} + \frac{T_1}{2T - 3T_1}; \quad (4)$$

l_a — длина линии;

$$r_{кр} = \sqrt{\frac{I_0 \rho_0}{2\pi E_{кр}}}.$$

Расчеты проводились для сопротивления заземления на удаленном конце линии в 50 Ом. На рис. 2 приведены графики тока импульса в линии для импульса тока амплитудой 10000, 20000 и 50000 А.

Хорошо видно, что на промежутке в несколько микросекунд имеется всплеск тока. Этот всплеск большей частью обусловлен скачком напряжения на заземлителе без искровой зоны. Величина этого скачка завышена по причинам, приведенным выше. На длительных временных интервалах медленный спад обусловлен током, протекающим через сопротивление заземлителя на удаленном конце линии.

Оценка влияния длины кабельной линии на Джоулев интеграл ответвляемого тока молнии

Изучим вопрос о влиянии длины кабельной линии на величину Джоулева интеграла тока молнии, ответвляемой в нее. Это влияние обусловлено волновыми процессами в длинной линии. Распространение электромагнитной волны вдоль кабеля с учетом ее отражений от концов, нагруженных на заземляющие сопротивления (сопротивление заземлителя и сопротивление заземления на удаленном конце), приводит к возникновению переходных процессов. Рассмотрим наиболее выраженную ситуацию возникновения переходных процессов. Будем полагать, что на заземлитель поступает прямоугольный токовый импульс. Приближение плоской вершины уместно ввиду того, что длительность импульса тока существенно превышает время распространения волны по линии

(даже если длина линии составляет порядка 100 м, то время распространения волны порядка 2 мкс, что заметно меньше десятков мкс, характерных для молниевых импульсов). При расчете переходного процесса будем пренебрегать активным сопротивлением линии кабеля (рассматриваются кабели длиной не более 100 м). Такая длинная линия, как нагрузка, моделируется активным сопротивлением ρ_v — волновым сопротивлением линии

$$\rho_v = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5)$$

где L и C — погонные индуктивность и емкость линии относительно земли.

Если $L = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $C = 2,5 \cdot 10^{-10}$ Ф/м, то $\rho_v \approx 70$ Ом. Для определения времени затухания переходных процессов нужна скорость распространения волны по линии. Она составляет

$$v_g = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}. \quad (6)$$

При приведенных выше значениях L и C скорость распространения составляет порядка $5,8 \cdot 10^7$ м/с, т. е. за 1 мкс волна проходит примерно 60 м.

Целью последующих вычислений является определение Джоулева интеграла тока, ответвляемого в жилу за время переходного процесса. За время переходного процесса примем промежуток времени, по прошествии которого отклонение тока от установившегося значения не будет превышать 10%. Переходный процесс возникает в случае, если сопротивление заземления на удаленном конце жилы отличается от волнового сопротивления линии (70 Ом). Обозначим через K_0 и K_1 коэффициенты отражения волны тока в начале линии и на удаленном конце соответственно:

$$K_0 = \frac{\rho - R_{з.б.}}{\rho + R_{з.б.}}; \quad K_1 = \frac{\rho - R_{з.к.}}{\rho + R_{з.к.}}, \quad (7)$$

где $R_{з.б.}$ — сопротивление заземления;

$R_{з.к.}$ — сопротивление заземления на удаленном конце.

Волна тока проходит по линии за время $\tau_0 = l/v_g$, где l — длина линии.

Для тока в линии с учетом прямых и обратных волн получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned} I^{(n)} &= I^{(0)} \cdot (1 + K_1 + K_1 \cdot K_0 + K_1^2 + (K_1 \cdot K_0)^2 + \dots + K_1^n + (K_1 \cdot K_0)^n) = \\ &= \frac{I^{(0)}}{1 - K_1 \cdot K_0} \cdot (1 + K_1 - (K_1 \cdot K_0)^n) \cdot (K_1 + K_1 \cdot K_0), \end{aligned} \quad (8)$$

где $I^{(0)} = \frac{R_{з.б.}}{\rho + R_{з.б.}} \times I$ — ток в линии на временном промежутке $0 < t < 2\tau_0$ (I — амплитуда тока молнии).

Выражение (8) справедливо для тока на временном промежутке $2n\tau_0 < t < (2n+2)\tau_0$. Число n представляет собой количество пробегов волны по линии в прямом и обратном направлениях. Установившееся значение тока

$$I_{уст} = I^{(\infty)} = \frac{I^{(0)} \cdot (1 + K_1)}{1 - K_1 \cdot K_0}. \quad (9)$$

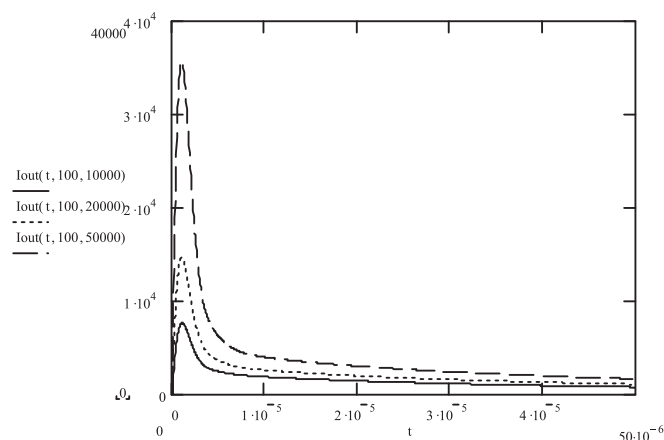


Рисунок 2 — Графики тока импульса в линии для импульса тока амплитудой 10000, 20000 и 50000 А

Это значение получаем, устремляя n к бесконечности и учитывая, что $(K_0 \cdot K_1)^n \rightarrow 0$. Число n_0 , определяющее длительность переходного процесса, определим из условия

$$n_0 = \left\lceil \frac{-1}{\lg(K_1 \cdot K_0)} \right\rceil + 1, \quad (10)$$

где n_0 — наименьшее целое решение неравенства $(K_0 \cdot K_1)^n = 0,1$.

Сопrotивление заземлителя описывается формулой

$$R_{з.б.}(I_1) = \frac{\rho_0}{2\pi r(I_1)} = \frac{\rho_0}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2\pi E_{кр}}{\rho_0 I_1}} = \sqrt{\frac{\rho_0 E_{кр}}{2\pi I_1}} = \frac{A}{\sqrt{I_1}}, \quad (11)$$

где $A = \sqrt{\frac{\rho_0 E_{кр}}{2\pi}}$.

Для вычисления Джоулева интеграла положим, что сопротивление заземлителя определяется по формуле (11) при $I_1 = I - \frac{A}{2\rho^2}(\sqrt{4\rho^2 I + A^2} - A)$. Джоулев интеграл за время пере-

ходного процесса находим путем суммирования Джоулевых интегралов по всем n_0 временным интервалам ($2\tau_0$)

$$\Delta Q = 2\tau_0 \sum_{n=0}^{n_0} (I^{(n)})^2 = 2\tau_0 (I^{(0)})^2 \cdot \sum_{n=0}^{n_0} \left(\frac{1 + K_1 - (K_1 \cdot K_0)^n \cdot (K_1 + K_1 \cdot K_0)}{1 - K_1 \cdot K_0} \right)^2 = \frac{2\tau_0 (I^{(0)})^2}{(1 - K_1 \cdot K_0)^2} \cdot \left\{ (n_0 + 1) \cdot A^2 - 2A \cdot B \cdot \frac{1 - q^{n_0+1}}{1 - q} + B^2 \cdot \frac{1 - q^{2n_0+2}}{1 - q^2} \right\} \quad (12)$$

где $A = 1 + K_1$; $B = K_1(1 + K_0)$; $q = K_1 \cdot K_0$.

Пренебрегая q^{n_0+1} и q^{n_0+2} , получим следующую приближенную формулу для Джоулева интеграла за время переходного процесса:

$$\Delta Q \approx \frac{2\tau_0 (I^{(0)})^2}{(1 - K_1 \cdot K_0)^2} \cdot \left\{ (n_0 + 1) \cdot A^2 + \frac{B^2}{1 - q^2} - \frac{2A \cdot B}{1 - q} \right\}. \quad (13)$$

Оценка влияния длины линии на Джоулев интеграл получается сравнением ΔQ из формулы (13) и Джоулева интеграла импульса тока молнии в линии, полученного при пренебрежении волновыми процессами в линии Q ,

$$Q = I^2 \cdot T \cdot \left(\frac{4}{\alpha} + \frac{16}{\alpha^2} (1 - \ln 2 - \sqrt{1 + \alpha} + \ln(\sqrt{1 + \alpha} + 1)) \right), \quad (14)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{8\pi R_{з.б.}^2 I}{\rho_0 E_{кр}};$$

T — длительность импульса тока молнии (на половине амплитуды).

Оценка влияния длины выражается величиной процентного отношения ΔQ и Q

$$\delta\% = \frac{\Delta Q}{Q} \cdot 100\%. \quad (15)$$

С использованием формулы (15) вычислены значения $\delta\%$ при различных значениях амплитуды тока молнии, длины линии и сопротивления заземления на удаленном конце. Зададимся длительностью импульса тока молнии на половине амплитудного значения в 30 мкс ($T = T_{1/2}/\ln 2$). Параметры грунта: критическая напряженность — 10 кВ/м, удельное сопротивление грунта — 200 Ом·м. Рассматривается точечный заземлитель. Расчеты показали, что для R в диапазоне от 10 до 100 Ом при длине линии 20 м и токе в диапазоне до 100 кА $\delta\%$ не превосходит 7%. В тех же самых условиях при длине линии в 50 м $\delta\%$ не превосходит 16%. При длине линии в 100 м $\delta\%$ может превосходить 30%.

Выводы

При проектировании современных микропроцессорных централизаций для снижения потенциала на портах полупроводниковых устройств, связанных с напольным оборудованием, следует приближать точку подключения заземления МПУ как можно ближе к УЗИП, в пределе — к выводу УЗИП.

Переходные процессы в линии оказывают незначительное влияние на величину Джоулева интеграла (не более десятков процентов). Поэтому произведенные ранее вычисления Джоулева интеграла при пренебрежении влияния реактивностей длинной линии можно считать адекватными. Следует отметить, что с ростом длины линии $\delta\%$ растет. В связи с этим расчетные формулы можно применять, если длина линии порядка 100 м и меньше ($\delta\% \sim 30\%$).

Литература

1. Характеристики импульсных воздействий на системы ЖАТ: временные нормы // Защита систем железнодорожной автоматики и телемеханики от атмосферных и коммутационных перенапряжений / ПКТБ ЦШ ОАО «РЖД», 2007. С. 18.
2. Лоторейчук Е.А. Расчет электрических и магнитных цепей и полей. М.: Форум, 2005. С. 246.
3. Костроминов А.М., Костроминов Ал-р А., Костроминов А.А., Бирюков А.П. Модели молниевых перенапряжений на заземлителях // 8-й Международ. симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: труды симпозиума. 2009. С. 77—80.

References

1. PKTB TSSh ОАО RZhD. Zashchita sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki ot atmosferynykh i kommutatsionnykh perenaprjazhenij [Protection of railway automatics and telemechanics systems against atmospheric and switching overvoltages]. Kharakteristiki impulsnykh vozdeystvij na sistemy ZhAT. Vremennye normy. 2007. S. 18.
2. Lotoreichuk E.A. Raschjot elektricheskikh i magnitnykh tsepej i polej [Calculation of electric and magnetic circuits and fields]. M.: ID «Forum». 2005. S. 246.
3. A.M. Kostrominov, Al-r A. Kostrominov, Aleksei A. Kostrominov, A.P. Biryukov. Modeli molnievykh perenaprjazhenij na zazemliteljah [Models of lightning overvoltages on grounding]: Trudy 8-go Mezhdunarodnogo simpoziuma po elektromagnitnoj sovmestimosti i elektromagnitnoj ekologii. 2009. S. 77 – 80.

УДК 629.46.083

Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Вадим Александрович Пранов, инженер, ассистент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ РЕСУРСА БОКОВОЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УСТАЛОСТНЫХ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Alexander V. Smolyaninov, DSc, Prof. of "Railway cars" department, The Ural State University of Railway Transport (USURT)
Vadim A. Pranov, engineer, assistant lecturer of "Railway cars" department, The Ural State University of Railway Transport (USURT)

Improvement Of Estimation Accuracy Of Side Frames Resource Of Freight Car's Bogie According To Results Of Fatigue Bench Tests

Аннотация

Предложена уточненная методика усталостных стендовых испытаний боковой рамы тележки грузового вагона, позволяющая повысить точность оценки ресурса детали. За основу взяты данные об усталостных отказах боковых рам в эксплуатации и их усталостной выносливости.

Существующая на данный момент методика усталостных стендовых испытаний дает указание по нагружению боковой рамы только вертикальной нагрузкой. Такая схема нагружения позволяет оценивать усталостную выносливость только двух зон — углов буксового и рессорного проемов, так как только по этим двум зонам происходит разрушение детали при подобных испытаниях. Однако, как показывает опыт, по остальным зонам суммарное количество усталостных трещин в эксплуатации значительно больше. Это, а также анализ зарубежных методик испытаний говорит о том, что задача уточнения существующей методики является актуальной.

В работе получена методика усталостных испытаний, которая позволяет нагружать на стенде все опасные зоны боковой рамы, получая характер усталостных повреждений, как в эксплуатации, что повышает точность оценки ресурса детали.

Ключевые слова: боковая рама, тележка, грузовой вагон, усталостные стендовые испытания, оценка ресурса.

Annotation

Improved method for fatigue bench tests of side frame of freight car's bogie that allows to improve estimation accuracy of detail resource is offered. The data of fatigue failures of side frames during operation and their fatigue endurance is taken as a base.

The existing method for fatigue bench tests gives recommendations for side frames loading only by vertical load. Such load distribution allows to estimate fatigue endurance only of two zones — box and spring openings' angles where detail can be broken during such tests. However, in other zones total number of fatigue cracks during operation is much bigger. This factor and analysis of foreign tests show that improvement technique for the existing method is urgent.

The method for fatigue bench tests that allows to load all the dangerous areas on test benches of side frames finding fatigue damages during operation improves estimation accuracy of detail resource.

Key words: side frames, bogie, freight car, fatigue bench test, resource evaluation

В настоящее время основными ходовыми частями, подкачиваемыми под грузовые вагоны, являются тележка модели 18-100 и ее модификации. Благодаря простоте конструкции (основные несущие элементы — две боковые рамы и наддрессорная балка) и обслуживания тележка эксплуатируется на протяжении уже многих лет. Причем, как показывают многочисленные исследования и обширный опыт эксплуатации, несмотря на проводимые за это время изменения конструкции ходовых частей, боковая рама тележки обладает низкой величиной средней наработки до отказа [1]. Одна из причин — недостаточная усталостная выносливость боковой рамы, в том числе из-за больших амплитудных напряжений, возникающих в различных зонах детали в течение эксплуатации. В то же время существующая методика усталостных стендовых испытаний [2], которая позволяет оценить качество изготовления натурных деталей на стадии конструирования, дает указание по нагружению боковой рамы только вертикальной нагрузкой (рис. 1). Такая схема нагружения позволяет оценивать усталостную выносливость только двух зон — углов буксового и рессорного проемов, так как только по этим двум зонам происходит разрушение детали при подобных испытаниях. Однако, как показывает опыт, по остальным зонам суммарное количество усталостных трещин в эксплуатации значительно больше [1]. Это, а также анализ зарубежных методик испытаний [3] говорит о том, что задача уточнения существующей методики [2] является актуальной.

Таким образом, уточненная методика должна обеспечить характер разрушений боковой рамы при испытаниях, как в эксплуатации. Для этого необходимо оценить динамическую нагруженность детали во время работы под вагоном, а полученные амплитудные усилия использовать для новой схемы испытаний. Для решения поставленной задачи воспользуемся доступными данными — об эксплуатационных отказах боковых рам и об их отказах во время проведения усталостных стендовых испытаний по действующей методике. Поскольку для стендовых испытаний известны и амплитуда нагрузки, и вероятность отказа, а по данным из эксплуатации

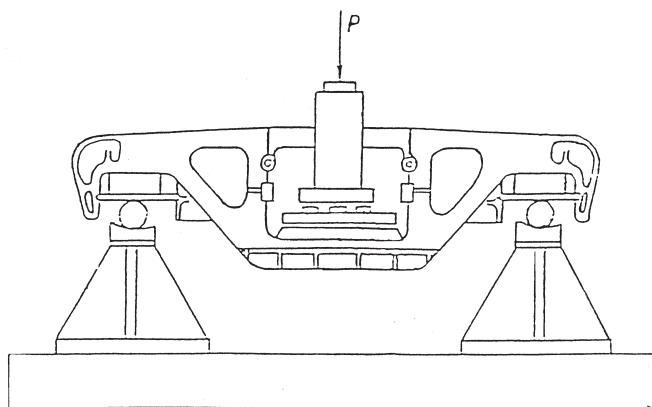


Рисунок 1 — Схема усталостных стендовых испытаний ГосНИИВ-ВНИИЖТ

можно определить эксплуатационную вероятность отказа, то, сравнив указанные вероятности, получим динамическую нагруженность детали во время работы под вагоном.

Для начала оценим усталостную выносливость боковой рамы при воздействии на нее заданной амплитудной нагрузки, проанализировав результаты усталостных стендовых испытаний детали, проводимых на ФГУП «ПО УВЗ» по действующей методике. Данные испытаний позволили получить плотность распределения вероятности отказа боковой рамы $f_c(\sigma)$ в зависимости от действующих напряжений σ согласно

формуле

$$f_c(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\sigma - c)^2}{2d^2}}, \quad (1)$$

где c и d — параметры распределения (120 МПа и 18,9 МПа соответственно);

σ — предел прочности.

Тогда расчетную вероятность отказа как интегральную функцию, используя плотность распределения (1), можно получить по формуле

$$P(\sigma_{\text{эж}} > \sigma) = \int_0^{\sigma_{\text{эж}}} f_c(\sigma) d\sigma, \quad (2)$$

где $P(\sigma_{\text{эж}} > \sigma)$ — теоретическая вероятность отказа детали для базы испытаний N_0 циклов;

$\sigma_{\text{эж}}$ — амплитудное напряжение, эквивалентное по разрушающему действию эксплуатационным, действующим на деталь для базы испытаний N_0 циклов, для каждой из j зон детали, согласно [4], определяется по формуле

$$\sigma_{\text{эж}} = \sqrt[m]{\frac{1}{N_0} \cdot t \cdot f \cdot (k_{\Phi} \cdot \sigma_j)^m}, \quad (3)$$

где σ_j — средние эксплуатационные амплитуды напряжений в j -й зоне детали-аналога;

f — частота изменения динамических напряжений;

N_0 — число циклов, соответствующее точке перегиба кривой усталости в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_j - \lg N_i$ (поскольку кривые усталости литых деталей тележек грузовых

вагонов, изготовленных из низколегированной стали, не имеют точки перегиба, то условно принимается $N_0 = N_6 = 10^7$ циклов);

k_{Φ} — коэффициент форсирования (запаса прочности).

Напряжения σ_j из формулы (3) можно представить в виде

$$\sigma_{\Sigma} = \sum_i \sigma_{ji} = \sum_i k_{ji} \cdot P_i, \quad (4)$$

где P_i — величина амплитудной нагрузки, эквивалентной по повреждающему действию эксплуатационным, приложенной в i -й точке детали;

σ_{ji} — величина амплитудного напряжения в j -й зоне детали от действия амплитудной эквивалентной силы P_i , приложенной в i -й точке детали;

k_{ji} — коэффициент пропорциональности между напряжением σ_{ji} в j -й зоне детали от действия амплитудной эквивалентной силы P_i , приложенной в i -й точке детали.

Нагрузки P_i , действующие на боковую раму во время ее работы, можно разделить на продольные, поперечные и вертикальные (рис. 2):

вертикальная — опора на буксовые проемы ($P_{\text{закр1}}$, $P_{\text{закр5}}$), нагружение на нижний пояс рессорного проема перпендикулярно плоскости пути ($P_{\text{верт3}}$);

поперечная — нагружение по нижнему поясу рессорного проема перпендикулярно направлению движения вагона ($P_{\text{закр4}}$), закрепление в буксовых проемах ($P_{\text{бок5}}$, $P_{\text{бок6}}$);

сила от распора фрикционными клиньями вдоль движения вагона ($P_{\text{пр4}}$, $P_{\text{закр2}}$);

продольная на «растяжение» рамы, закрепление за вертикальную внутреннюю поверхность рессорного проема в районе фрикционных клиньев ($P_{\text{закр3}}$), нагружение на наружную вертикальную опору буксового проема вдоль движения вагона ($P_{\text{пр1}}$);

продольная на «сжатие» рамы, закрепление за вертикальную внутреннюю поверхность рессорного проема в районе фрикционных клиньев ($P_{\text{закр2}}$), нагружение на внутреннюю вертикальную опору буксового проема вдоль движения вагона ($P_{\text{пр2}}$).

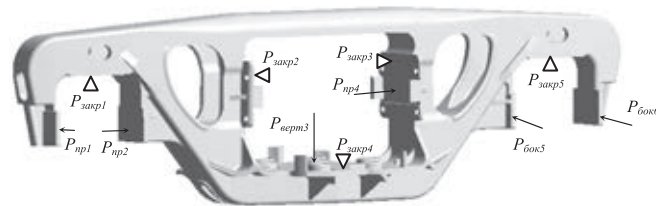


Рисунок 2 — Расчетные нагрузки, действующие на боковую раму

Далее оценим эксплуатационную вероятность отказа, воспользовавшись работой [5], где показано, что опытные данные об усталостных отказах боковых рам хорошо аппроксимируются логнормальным законом

$$F^*(t) = \Phi\left(\frac{\lg t - a}{b}\right) + 0,5, \quad (5)$$

где $\Phi(\cdot)$ — функция Лапласа, имеющая вид

$$\Phi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (6)$$

где a и b — параметры логнормального закона, определяемые по формулам:

$$a = \lg M(t) - 0,493 \lg [1 + V^2(t)]; \quad (7)$$

$$b = 0,645 \sqrt{\lg [1 + V^2(t)]}, \quad (8)$$

где $V(t)$ — коэффициент вариации;

$M(t)$ — математическое ожидание.

При помощи формул (5)—(8) по всем опасным зонам боковой рамы, используя данные отдела надежности ПКБ ЦВ, полученные по всей сети железных дорог [1], были рассчитаны параметры распределения a и b (табл. 1).

Таблица 1 — Значения параметров распределения

Параметр	Значения параметров для указанных зон боковой рамы						
	Наружный угол буксового проема	Внутренний угол буксового проема	Нижний угол рессорного проема	Верхний угол рессорного проема	Надбуксовый проем	Технологическое окно	Наклонный пояс
a	3,89	5,23	9,2	5,08	3,45	4,63	7,79
b	0,97	1,37	2,35	1,48	0,93	1,33	2,15

Как видно из формул (5) и (6), эксплуатационная вероятность отказа (5) в развернутом виде имеет следующий вид:

$$F^*(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx + 0,5. \quad (9)$$

В то же время вероятность отказа по j -й зоне при действии неизвестных амплитудных усилий P_j согласно (1)—(4), может быть представлена как

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx + 0,5. \quad (10)$$

Сравнив вероятности (9) и (10), видим, что у них различаются только пределы интегрирования. Учитывая это, а также то, что при одновременном действии амплитудных усилий P_i равенство выражений (9) и (10) должно выполняться для каждой из j -й зон боковой рамы, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\lg(t) - a_1}{b_1} = \frac{(k_{11} \cdot P_1 + k_{12} \cdot P_2 + \dots + k_{1i} \cdot P_i) \cdot \sqrt[m]{t} - c}{d} \\ \frac{\lg(t) - a_2}{b_2} = \frac{(k_{21} \cdot P_1 + k_{22} \cdot P_2 + \dots + k_{2i} \cdot P_i) \cdot \sqrt[m]{t} - c}{d} \\ \dots \\ \frac{\lg(t) - a_j}{b_j} = \frac{(k_{j1} \cdot P_1 + k_{j2} \cdot P_2 + \dots + k_{ji} \cdot P_i) \cdot \sqrt[m]{t} - c}{d} \end{cases} \quad (11)$$

Путем решения системы уравнений (11) были получены соотношения величин амплитудных нагрузок, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2 — Соотношение величин эквивалентных нагрузок

Нагрузка	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
Величина	$3,2 \cdot P_5$	$3,2 \cdot P_5$	$20 \cdot P_5$	$2,96 \cdot P_5$	-	$4 \cdot P_5$

Расчеты показали, что система уравнений (9) имеет численное решение в случае приложения нагрузок $P_{прод1}$ и $P_{прод4}$ неравномерно к контактной поверхности, как показано на рис. 3.

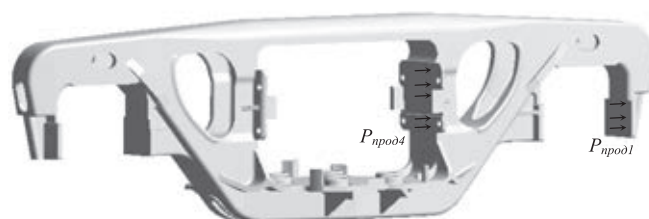


Рисунок 3 — Нагрузки, неравномерно приложенные к боковой раме

Об этом говорит и опыт эксплуатации: в рессорном проеме вероятность отказа по верхнему углу примерно равна вероятности отказа по внутреннему углу буксового проема и значительно выше, чем для нижнего угла рессорного проема [1], что возможно при приложении продольных сил лишь согласно рис. 3. Это соответствует и схеме работы тележки с нежесткой конструкцией, когда наддресорная балка и колесные пары работают в качестве поперечных и продольных тяг, что влечет за собой повышенные нагрузки в местах кинематических связей [6].

Таким образом, используя рис. 2 и 3, методику [3], а также табл. 2, получим уточненную схему усталостных стендовых испытаний боковой рамы (рис. 4).

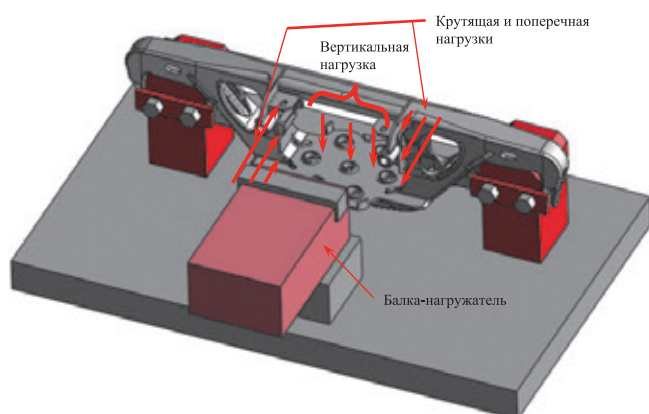


Рисунок 4 — Схема уточненных стендовых усталостных испытаний

Размерность нагрузок определяется в зависимости от принятых величин частоты нагружения, коэффициента

форсирования, среднего напряжения по каждой из зон боковой рамы и многих других согласно (3). Подобные величины определяются исходя из конструктивных ограничений конкретного стенда. При этом боковая рама может рассматриваться как система с последовательным соединением элементов, где под элементами подразумеваются зоны изломов детали. Анализ опытных данных показывает, что вероятность безотказной работы всей системы в целом P_{Σ} соответствует следующей зависимости (согласно [7]):

$$P_{\Sigma} \approx \min (P_i), \quad (10)$$

где P_i — вероятность безотказной работы наименее надежного элемента.

Рассчитанные таким образом нагрузки и другие величины при проведении усталостных испытаний по разработанной методике позволяют нагружать на стенде с измененной конструкцией все опасные зоны боковой рамы, получая характер усталостных повреждений, как в эксплуатации, а значит, и повысить точность оценки ресурса детали.

Литература

1. Смолянинов А.В., Пранов В.А. Анализ повреждаемости боковых рам тележек грузовых вагонов в эксплуатации // Транспорт Урала. 2007. № 4 (15). С. 65—69.
2. Надрессорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методики испытаний на усталость / ГосНИИВ — ВНИИЖТ. М., 2000. 12 с.
3. AAR Specification M-203-05 Specification for Truck Side Frames, Cast Steel. 22 p.
4. Методика исследования и оценки усталостной прочности вагонных конструкций и их узлов / ВНИИВ-ЦНИИ МПС. М., 1968. 18 с.
5. Пранов В.А. Методика оценки эксплуатационной надежности литых деталей тележки грузового вагона // Транспорт Урала. 2011. № 2 (29). С. 56—61.
6. Пранов В.А., Смолянинов А.В. Снижение нагруженности литых деталей в перспективных тележках // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура : матер. науч.-техн. конф., посв. 55-летию УрГУПС : в 2 т. / Уральский государственный университет путей сообщения. 2011. Вып. 97 (180). Т. 1. С. 160—164.
7. Капур К., Ламберсон Л.. Надежность и проектирование систем. М. : Мир, 1980. 604 с.

References

1. Smolyaninov A. V., Pranov V. A. Analiz povrezhdaemosti bokovykh ram telezhok gruzovykh vagonov v ekspluatatsii [The analysis of side frames' damage factors of freight cars' bogies during operation] // Transport Urala. 2007. № 4(15). S. 65-69.
2. Nadressornye balki i bokovye ramy litye dvukhosnykh telezhok gruzovykh vagonov kolei 1520 mm. Metodiki ispytanij na ustalost [Bogie bolsters and cast side frames of freight cars' four-wheel bogies of track 1520 mm] / GosNIIV – VNIIZhT. M., 2000. 12 s.
3. AAR Specification M-203-05 Specification for Truck Side Frames, Cast Steel, 22 page.
4. Metodika issledovaniya i otsenki ustalostnoj prochnosti vagonnykh konstruksij i ih uzlov [Research methods and estimation of fatigue resistance of car constructions and its junctions] / VNIIV-TSNII MPS. M., 1968. 18 s.
5. Pranov V.A. Metodika otsenki ekspluatatsionnoj nadezhnosti litykh detalej telezhki gruzovogo vagona [Method of operation reliability assessment of freight car bogie's moulded pieces] // Transport Urala. 2011. № 2 (29). S. 56-61.
6. Pranov V.A., Smolyaninov A.V. Snizhenie nagruzhennosti litykh detalej v perspektivnykh telezhkah [Load reduction of moulded pieces in perspective bogies] // Transport XXI veka: issledovaniya, innovatsii, infrastruktura: materialy nauchn.-tekhn. konf., posv. 55-letiju UrGUPS: v 2 t. / Uralskij gosudarstvenny universitet putej soobshcheniya. 2011. Vyp. 97(180), t. 1. S. 160-164.
7. Kapur K., Lamberson L. Nadezhnost i proektirovanie sistem [Reliability and design of systems]. M.: Mir, 1980. 604 s.

УДК 639.4.015

Иван Александрович Добычин, доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), главный научный сотрудник ЗАО НПП «ТОРМО»
Михаил Юрьевич Градинаров, научный сотрудник ЗАО НПП «ТОРМО»
Валерий Викторович Трошков, инженер ЗАО НПП «ТОРМО»

ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕССОРНЫХ КОМПЛЕКТОВ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПУТЕМ ПОДБОРА ПРУЖИН ПО СИЛОВЫМ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Ivan A. Dobychin, DSc, prof. of "Mechatronics" department, USURT, senior scientific associate of CJSC Research & Development Production Enterprise "TORMO"
Mikhail Yu. Gradinarov, scientific associate (CJSC Research & Development Production Enterprise "TORMO")
Valery V. Troshkov, engineer (CJSC Research & Development Production Enterprise "TORMO")

Forming Of Spring Groups Of Freight Cars' Bogies By Springs' Choice According To Power And Geometric Parameters

Аннотация

На основе статистического анализа разброса характеристик пружин и анализа собственных колебаний обрессоренных масс вагона выявлены недостатки существующего способа подбора пружин в рессорные комплекты тележки грузового вагона (соответствующего действующим нормативным документам) и показана необходимость учета не только геометрических, но и силовых параметров пружин. Предложены динамические критерии качества работы рессорных комплектов тележки 18-100 при подборе комплектов пружин.

Ключевые слова: тележка грузового вагона, рессорный комплект, подбор пружин, критерии качества.

Annotation

On the basis of statistical analysis of springs' characteristics spread and analysis of natural vibrations of railway car sprung mass the disadvantages of the existing method of spring choice to spring groups of freight car's bogie are detected (according to normative documents) and the need of geometric and force parameters of springs is showed. Dynamic criteria of work quality of spring groups of bogies 18-100 by springs' choice are offered.

Key words: freight car's bogie, spring group, spring choice, quality factors.

Оптимальным подбором элементов рессорных комплектов тележек грузовых вагонов можно значительно повысить уровень безопасности движения и сохранности грузов, а также увеличить межремонтный пробег подвижного состава. При этом на первый план выходят задачи разработки критериев формирования рессорных комплектов в целом и подбора пружин в частности с учетом разброса характеристик пружин и реальных условий эксплуатации.

Исходные положения и характеристики рессорных комплектов

В каждый из двух рессорных комплектов тележки грузового вагона типа 18-100 входят по 7 двухрядных пружин — 7 наружных и 7 внутренних (рис. 1), из которых две находятся под фрикционными клиньями (подклиновые пружины), а остальные образуют центральный комплект. Предполагается, что пружины предварительно обрабатываются на специализированной установке, которая для каждой наружной и внутренней пружины определяет коэффициенты жесткости C_r , C_i

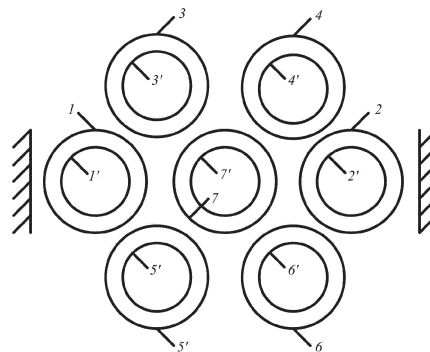


Рисунок 1 — Расположение и нумерация пружин в рессорном комплекте тележки типа 18-100

и их эффективные длины l_p, l'_i соответственно. Геометрические длины пружин l_{i0}, l'_{i0} в ненагруженном состоянии могут отклоняться от их эффективных длин l_p, l'_i , которые определяются путем линейной аппроксимации соответствующих силовых характеристик (рис. 2).

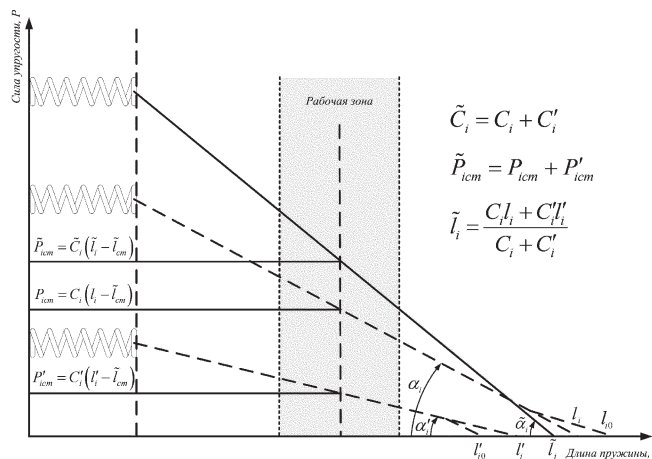


Рисунок 2 — Схема к определению эффективной длины сдвоенной пружины

Эффективную жесткость $\tilde{C}_i$ и эффективную длину $\tilde{l}_i$ (высоту) одиночной двухрядной пружины будем определять в виде

$$\tilde{C}_i = C_i + C'_i, \quad \tilde{l}_i = \frac{C_i l_i + C'_i l'_i}{C_i + C'_i}, \quad (1)$$

а для группы двухрядных пружин центрального комплекта и совокупности подклиновых пружин — соответственно в виде

$$\begin{cases} C_o = \sum_{i=3}^7 \tilde{C}_i, & H_o = \frac{\sum_{i=3}^7 \tilde{C}_i \tilde{l}_i}{\sum_{i=3}^7 \tilde{C}_i}, \\ C_{кл} = \tilde{C}_1 + \tilde{C}_2, & H_{кл} = \frac{\tilde{C}_1 \tilde{l}_1 + \tilde{C}_2 \tilde{l}_2}{\tilde{C}_1 + \tilde{C}_2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $C_o, C_{кл}$ — эффективные (совокупные) жесткости, а $H_o, H_{кл}$ — эффективные высоты соответственно, и следует учесть (1).

Обработка массивов числовых данных из обобщенной базы данных установок ЛИСП [1], расположенных на сети дорог, показала наличие значительного разброса характеристик пружин как по длине, так и по жесткости (стреле прогиба). На АЛИСП определялись эффективные длины l_p, l'_i и статические прогибы $\lambda_{icm}, \lambda'_{icm}$ наружных и внутренних пружин под нагрузкой 1900 и 900 кгс соответственно. Полученные результаты для тележек 18-100 приведены в табл. 1.

Отдельные пружины или группы пружин будем считать эквивалентными, если они имеют одинаковые эффективные жесткости и одинаковые эффективные длины (или высоты).

Таблица 1 — Результаты измерений эффективных длин и жесткостей пружин

Диаметр прутка, мм	30	19	21
Минимальная длина пружины $l_i^{\min}$, мм	242	242	242
Максимальная длина пружины $l_i^{\max}$, мм	259	259	259
Минимальный статический прогиб (под нагрузкой 1900 кгс для наружной и 900 кгс для внутренней пружины) $\lambda_{icm}^{\min}$, мм	45	45	31
Максимальный статический прогиб (под нагрузкой 1900 кгс для наружной и 900 кгс для внутренней пружины) $\lambda_{icm}^{\max}$, мм	54	59	41
Минимальная жесткость пружины $C_i^{\min}$, кН/м	332,8	133,0	196,2
Минимальная жесткость пружины $C_i^{\max}$, кН/м	490,5	182,5	261,6
Номинальная жесткость пружины $C_{ном}$, кН/м	384,3	153,8	224,0
Средняя жесткость пружины $C_{ср}$, кН/м	379,7	152,2	222,1

При определении характеристик рессорного комплекта в целом следует учесть наличие завывшений (занижений) клиньев Δ', Δ'' [2], что при статическом нагружении центрального комплекта пружин до высоты H_{cm} приводит к нагружению подклиновых пружин до высоты $H_{1cm}^{кл} = H_{cm} - \Delta', H_{2cm}^{кл} = H_{cm} - \Delta''$. В дальнейшем будем предполагать

$$H_{1cm}^{кл} = H_{2cm}^{кл} = H_{cm} - \Delta, \quad \text{где } \Delta = \frac{\Delta' + \Delta''}{2}, \quad (3)$$

Наличие завывшений клиньев существенно влияет на величины сил трения на вертикальных фрикционных планках, а следовательно, и на качество работы рессорного комплекта как упруго-фрикционного гасителя колебаний.

Отметим, что в соответствии с нормативными документами [3] допускаются следующие величины завывшения клиньев: после депоовского ремонта $\Delta \in (+2, -8) \text{ мм}$; после отцепочного ремонта $\Delta \in (+5, -12) \text{ мм}$; в эксплуатации $\Delta \in (+8, -15) \text{ мм}$.

На рис. 3 представлена типовая одномерная силовая характеристика рессорного комплекта тележки 18-100 и показаны основные размеры и обозначения. В частности: H_o, H_{cm}, H — начальная, статическая и текущая высота центрального комплекта пружин соответственно; $H_{\min}$ — минимально допустимая высота центрального комплекта пружин при сжатии; $z = H_{cm} - H$ — вертикальное перемещение (отклонение) обрессоренной массы (кузова), отсчитываемое от положения статического равновесия; $\dot{z} = -\dot{H}$ — относительная скорость обрессоренной массы; $\lambda_o, \lambda_{кл}$ — статические прогибы центрального комплекта пружин и подклиновых пружин соответственно.

Для $\lambda_o, \lambda_{кл}$ справедливы выражения:

$$\begin{cases} \lambda_o = H_o - H_{cm} = \frac{mg - C_{кл}(H_{кл} - H_o + \Delta)}{C_o + C_{кл}}; \\ \lambda_{кл} = H_{кл} - H_{cm} + \Delta = \frac{mg - C_o(H_{кл} - H_o + \Delta)}{C_o + C_{кл}}, \end{cases} \quad (4)$$

где m — масса обрессоренной части вагона, приходящаяся на один рессорный комплект;

g — ускорение свободного падения.

Аналитическое выражение силовой характеристики представим в виде (см. рис. 3)

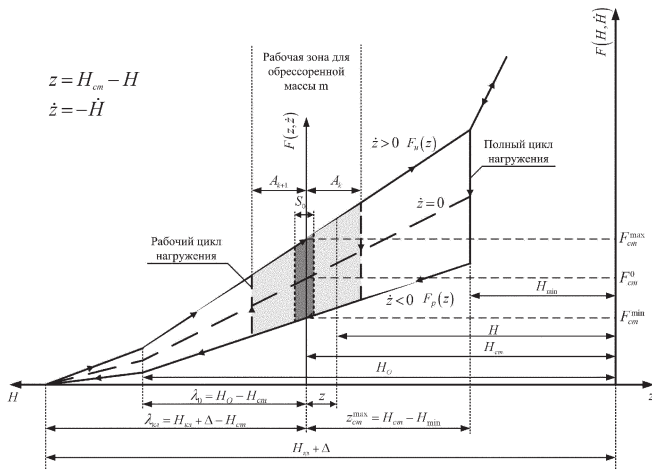


Рисунок 3 — Силовая характеристика рессорного комплекта тележки типа 18-100

$$F(z, \dot{z}) = \begin{cases} F_n(z) & \text{при } \dot{z} > 0 \text{ (нагружение)} \\ F_p(z) & \text{при } \dot{z} < 0 \text{ (разгрузка)} \end{cases}, \quad (5)$$

где

$$F_n(z) = \begin{cases} (C_n - C_0)(z + \lambda_{кл}) & \text{при } z \in [-\lambda_{кл}, \lambda_o], \\ C_n(z + \lambda_o) + (C_n - C_0)(\lambda_{кл} - \lambda_o) & \text{при } z > -\lambda_o, \end{cases}$$

$$F_p(z) = \begin{cases} (C_p - C_0)(z + \lambda_{кл}) & \text{при } z \in [-\lambda_{кл}, \lambda_o], \\ C_p(z + \lambda_o) + (C_p - C_0)(\lambda_{кл} - \lambda_o) & \text{при } z > -\lambda_o. \end{cases} \quad (6)$$

В выражениях (6) обозначено:

$$\begin{aligned} C_n &= C_{кл}(1 + \varphi_n) + C_o; \\ C_p &= C_{кл}(1 - \varphi_p) + C_o, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{cases} \varphi_n = \frac{f_\phi(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{(1 + f_\phi f) \cos \alpha - (f_\phi - f) \sin \alpha}; \\ \varphi_p = \frac{f_\phi(\sin \alpha + f \cos \alpha)}{(1 + f_\phi f) \cos \alpha + (f_\phi - f) \sin \alpha}. \end{cases} \quad (8)$$

В выражениях (4), (6), (7) величины эффективных жесткостей C_o и $C_{кл}$ определены выражениями (2).

Рессорный комплект тележки типа 18-100, как видно из рис. 3 и формул (5)–(8), представляет собой упруго-фрикционный гаситель колебаний с позиционным кулоновым трением.

Колебания обрессоренных масс и динамические расчетные параметры рессорных комплектов

Собственные вертикальные колебания обрессоренной массы m вагона, приходящиеся на один рессорный комплект, описываются дифференциальным уравнением $m\ddot{z} + F(z, \dot{z}) = mg$.

Учитывая выражение для $F(z, \dot{z})$ по (5)–(8), в «рабочей зоне» около положения устойчивого равновесия будем иметь два дифференциальных уравнения (см. рис. 3):

$$\begin{cases} \ddot{z} + k_n^2 z = 0, & \text{при } \dot{z} > 0, \quad z > -\lambda_o \text{ (нагружение)}; \\ \ddot{z} + k_p^2 z = 0, & \text{при } \dot{z} < 0, \quad z > -\lambda_o \text{ (разгрузка)}, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\begin{cases} k_n^2 = \frac{C_n}{m} = \frac{C_{кл}(1 + \varphi_n) + C_o}{m}; \\ k_p^2 = \frac{C_p}{m} = \frac{C_{кл}(1 - \varphi_p) + C_o}{m}. \end{cases} \quad (10)$$

Принимая в уравнениях (9) начальные условия (предполагаем, что $|A| \leq \lambda_o$)

$$t = 0 \Rightarrow z_0 = A, \quad \dot{z}_0 = 0, \quad (11)$$

получим характерные для системы с сухим трением затухающие колебания с периодом τ и круговой частотой k , определяемым в виде

$$\tau = \tau_n + \tau_p = \frac{\pi}{k_n} + \frac{\pi}{k_p}, \quad k = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{2k_n k_p}{k_n + k_p}, \quad (12)$$

где следует учесть (10).

Известно, что частота k , а следовательно, и период τ незначительно отличаются от частоты k_0 и периода τ_0 , полученных для случая отсутствия сил трения,

$$k \approx k_0 = \sqrt{\frac{C_{кл} + C_o}{m}}, \quad \tau \approx \tau_0 = \frac{2\pi}{k_0}. \quad (13)$$

Максимальные отклонения массы m в каждом периоде колебаний составят убывающую арифметическую прогрессию $A_0, A_1, \dots, A_k, \dots$ с показателем

$$A_k - A_{k-1} = 2S_0, \quad (14)$$

где S_0 — ширина полосы застоя (полосы положения статического равновесия обрессоренной массы с учетом сил трения на фрикционных планках), определяется как разность статических прогибов рессорного комплекта при разгрузке (λ_p) и нагрузке (λ_n) в виде

$$S_0 = \lambda_p - \lambda_n = [mg + C_o(H_{кл} + \Delta - H_o)] \frac{C_n - C_p}{C_n C_p} \quad (15)$$

или, учитывая выражения (7),

$$S_0 = \frac{C_{кл}(\varphi_n + \varphi_p)[mg + C_o(H_{кл} + \Delta - H_o)]}{[C_{кл}(1 + \varphi_n) + C_o][C_{кл}(1 - \varphi_p) + C_o]}, \quad (16)$$

где следует учесть (8).

Огибающая собственных затухающих колебаний $A(t)$ определяется в виде

$$A(t) = A_0 - 2S_0 \frac{t}{\tau}, \quad (17)$$

где A_0 — начальная амплитуда;

τ — период затухающих колебаний (11).

Из условия остановки собственных колебаний $A(t)_{t=t_{ост}} = S_0$ и (16) найдем время остановки

$$t_{ост} = \frac{\tau}{2} \left(\frac{A_0}{S_0} - 1 \right). \quad (18)$$

Коэффициент поглощения энергии Ψ получим как отношение энергии, рассеиваемой рессорным комплектом за один

цикл (W_A), к средней потенциальной энергии на том же цикле (Π_A) в виде

$$\Psi = \frac{W_A}{\Pi_A}, \quad (19)$$

где (см. рис. 3)

$$W_A = \int_{-A_{k+1}}^{A_k} [F_H(z) - F_P(z)] dz; \quad \Pi_A = \int_{-A_{k+1}}^{A_k} \left[\frac{F_H(z) + F_P(z)}{2} \right] dz.$$

Вычисляя эти интегралы с учетом (5)–(8), находим

$$\Psi = \frac{C_{кл}(\varphi_n + \varphi_p)(S_0 + \lambda_{кл})}{C_{кл}(2 + \varphi_n - \varphi_p)(S_0 + \lambda_{кл}) + C_0(\varphi_n + \varphi_p)(2S_0 + \lambda_0)}, \quad (20)$$

где следует учесть выражения (4), (8) и (15).

Параметры $H_{снр}$, S_0 и Ψ используются далее как основные критерии качества в задаче подбора пружин в рессорные комплекты тележки.

Условие устойчивости колесной пары против схода с рельсов

Устойчивость колесной пары в рельсовой колее оценивается коэффициентом устойчивости колеса против схода с рельса, учитывающим соотношение вертикальных и горизонтальных сил, возникающих при движении вагона. Этот коэффициент подсчитывается по формуле [4]

$$k_{y.к.} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu tg\beta} \frac{P_{e1}}{P_0} \geq [k_{y.к.}] \quad (21)$$

где $\beta = 60^\circ$;

$\mu = 0,25$ (β — угол наклона образующей гребня колеса с горизонталью; μ — коэффициент трения между поверхностями колеса и рельса);

P_{e1}, P_{e2} — вертикальные составляющие силы реакции соответственно набегающего и ненабегающего колеса на головку рельса;

P_0 — горизонтальная составляющая силы реакции набегающего колеса на головку рельса, действующая одновременно с силами P_{e1} и P_{e2} .

Вертикальные и горизонтальная составляющие силы определяются по формулам:

$$\begin{aligned} P_{e1} &= P_0 \left[\frac{b-a_2}{l} (1 - \bar{k}_{ДВ}) - \frac{b}{l} \bar{k}_{ДБ} \right] + H_p \frac{r}{l} + P_{кн} \frac{b-a_2}{l}; \\ P_{e2} &= P_0 \left[\frac{b-a_1}{l} (1 - \bar{k}_{ДВ}) + \frac{b}{l} \bar{k}_{ДБ} \right] - H_p \frac{r}{l} + P_{кн} \frac{b-a_1}{l}; \\ P_0 &= H_p + \mu P_{e2}, \end{aligned} \quad (22)$$

где P_0 , $P_{кн}$ — соответственно осевая статическая нагрузка и собственно сила тяжести колесной пары;

$\bar{k}_{ДВ}$ — среднее значение коэффициента вертикальной динамики (приблизительно $\bar{k}_{ДВ} = 0,75k_{ДВ}$).

При этом $\bar{k}_{ДВ}$ определяется по формуле

$$k_{ДВ} \approx A + \frac{Bv}{f_{cm}}, \quad (23)$$

где для грузовых 4-осных вагонов $v = 15 \dots 33 \text{ м/с}$; $A = 0,03$; $B = 0,0006$; f_{cm} — статический прогиб рессорного комплекта,

m ; $\bar{k}_{ДБ}$ — среднее значение коэффициента динамики боковой качки, приблизительно $\bar{k}_{ДБ} = 0,25 \bar{k}_{ДБ}$.

В расчетах также использовали коэффициенты динамики $k_z^{дин}$ и $k_\varphi^{дин}$ в виде

$$\bar{k}_{ДБ} = 0,75k_z^{дин}, \quad \bar{k}_{ДБ} = 0,75k_\varphi^{дин}. \quad (24)$$

При этом $k_z^{дин}$ и $k_\varphi^{дин}$ определяли при характерных вертикальных неровностях рельсовых нитей.

H_p — среднее значение рамной силы, вычисляемое по формуле

$$H_p = \frac{P_{op}}{m_0} k_{\delta z}, \quad P_{op} = m_{op} g, \quad (25)$$

где $k_{\delta z}$ — коэффициент горизонтальной динамики, определяемый по эмпирической формуле $k_{\delta z} = \lambda_2 \delta (40 + Fv)$, λ_2, δ — величины, зависящие от осности тележки и гибкости рессорного подвешивания ($\lambda_2 = 1$, $\delta \cdot 10^3 = 1$), F — коэффициент, равный для грузового вагона 4,5; m_{op} — масса вагона брутто. ([4], с. 224); b — половина расстояния между серединами шеек оси, для стандартных осей 1,018 м; l — расстояние между точками контакта колес, 1,555 м; a_1, a_2 — расстояния от точек контакта до середины шеек, 0,217 и 0,264 м соответственно; r — радиус колеса; m_0 — число колесных пар; P_{op} — сила тяжести вагона, брутто; для грузового вагона $[k_{y.к.}] = 1,4$.

Вынужденные колебания обрессоренной массы, обусловленные вертикальными неровностями рельсов

При моделировании колебаний обрессоренной массы вагона, приходящейся на одну тележку, в общем случае, когда неровности левой и правой рельсовых нитей несинхронны (различны), решали систему двух независимых дифференциальных уравнений

$$m_i \ddot{z}_i + F_i(z_i, \dot{z}_i) = m_i g - \frac{m_i}{2} [\ddot{\eta}_i(x-a) + \ddot{\eta}_i(x+a)], \quad (26)$$

где $F_i(z_i, \dot{z}_i)$, $\eta_i(x)$ — функции, описывающие силовую характеристику i -го рессорного комплекта и вертикальную неровность i -й рельсовой нити соответственно.

Колебания подпрыгивания (z) и боковой качки (φ) определялись в виде:

$$z = \frac{z_1 + z_2}{2}; \quad \varphi = \frac{z_1 - z_2}{2}. \quad (27)$$

Коэффициенты динамики определялись по формулам:

$$k_z^{дин} = \frac{k_{1z} + k_{2z}}{2}; \quad k_\varphi^{дин} = \frac{k_{1z} - k_{2z}}{2}, \quad (28)$$

где $k_{iz} = 1 + \frac{\ddot{z}_i + \ddot{\eta}_i}{g}$ ($i = 1, 2$).

В случае синхронных неровностей рельсов и одинаковых характеристик правого и левого рессорных комплектов использовали дифференциальное уравнение вертикальных движений обрессоренной массы

$$m \ddot{z} + F(z, \dot{z}) = mg - \frac{m}{2} [\ddot{\eta}(x-a) + \ddot{\eta}(x+a)], \quad (29)$$

где $\ddot{\eta}(x)$ — функция, описывающая вертикальные неровности рельсового пути ($\ddot{\eta}_1(x) = \ddot{\eta}_2(x) = \ddot{\eta}(x)$);

$2a$ — продольная база тележки;
 z — относительное перемещение обрессоренной массы;
 ξ — ее абсолютное перемещение,

$$\xi = z + \frac{1}{2}[\eta(x-a) + \eta(x+a)]. \quad (30)$$

Для сравнительного расчета вертикальных колебаний обрессоренных масс вагона, движущегося со скоростью $v = \text{const}$, в качестве функций возмущения принимали, как это рекомендуется для инженерных динамических расчетов [5], функции вида

$$\eta(t) = -a_1 \left| \sin \frac{1}{2} \omega t \right|, \quad (31)$$

где $a_1 = 6...25 \text{ мм}$;

$$\eta(t) = -\left| a_1 \sin \frac{1}{2} \omega t + a_2 \sin \frac{3}{2} \omega t \right|, \quad (32)$$

где $a_1 = 8...20 \text{ мм}$, $a_2 = 4...10 \text{ мм}$ и учтено, что

$$x = vt, \quad \omega = \frac{2\pi v}{L}, \quad (33)$$

где L — длина рельсовых звеньев (для обычного пути $L = 25 \text{ м}$).

При предварительном компьютерном анализе вертикальных колебаний приняты следующие значения жесткостей наружных ($C_i^{\text{нар}}$) и внутренних ($C_i^{\text{вн}}$) пружин:

$$C_i = C_i^{\text{нар}} = 384,3 \text{ кН/м}; \quad C_i' = C_i^{\text{вн}} = 153,8 \text{ кН/м}; \quad \tilde{C}_i = C_{i \text{ ном}} = 538,1 \text{ кН/м} \quad (34)$$

($\tilde{C}_i$ — для сдвоенных пружин).

Для жесткостей C_O и $C_{\text{кл}}$ учитывая (33), принимали

$$C_O = 5C_{\text{ном}} = 2690,5 \text{ кН/м}; \quad C_{\text{кл}} = 2C_{\text{ном}} = 1076,2 \text{ кН/м}.$$

В функциях $\varphi_n(f_\phi, f, \alpha)$ и $\varphi_p(f_\phi, f, \alpha)$ [(8)], через которые происходит учет фрикционных параметров системы, угол $\alpha = 45^\circ$, а коэффициенты трения выбирались в диапазонах $f_\phi = [0,1...0,6]$, $f = [0...0,2]$.

На рис. 4—6 для примера представлены результаты расчета вертикальных перемещений $z(t)$ обрессоренной массы (колебания подпрыгивания) и действующих на нее динамических сил $P_z(t) = m(g - \ddot{\xi})$, полученных для неровностей рельсовых нитей, описываемых функцией (31) при $a_1 = 25 \text{ мм}$, при различных значениях обрессоренной массы вагона $m = 16, 50, 80 \text{ т}$ (см. рис. 4), различных скоростях движения $v = 15, 25, 30 \text{ м/с}$ (см. рис. 5) и различных значениях коэффициента трения на фрикционной планке $f_\phi = 0,1...0,6$ (см. рис. 6).

На рис. 7 показано влияние на вертикальные колебания обрессоренной массы порожнего вагона ($m = 16 \text{ т}$) величины завывшения клиньев $\Delta = -5,0,5 \text{ мм}$. Расчеты проводились и при неровностях рельсовых нитей вида (31) и других регулярных неровностях, в частности, таких, как зазоры в стыках, ступеньки между отдающим и принимающим концами рельсов и др., которые приводят к импульсному воздействию на обрессоренные массы и способны вызвать чрезмерную энергетическую «подпитку» собственных колебаний системы.

Следует отметить одну существенную особенность собственных затухающих колебаний обрессоренной массы вагона. Если затухание при прочих равных условиях происходит на первой половине или трети длины неровности, то динами-

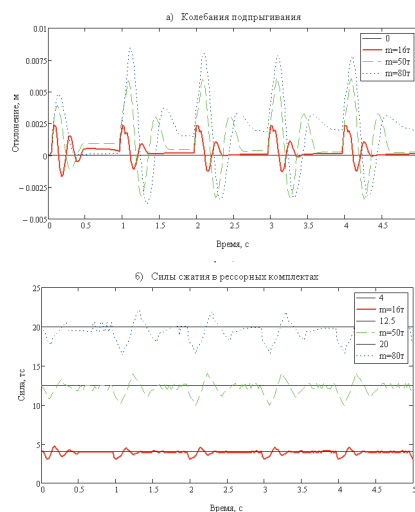


Рисунок 4а,б — Влияние массы обрессоренной части вагона на вертикальные колебания:
 массы обрессоренной части — 16, 50, 80 т;
 скорость — 25 м/с;
 коэффициент трения на фрикционной планке — 0,1;
 завывшение клина — 0

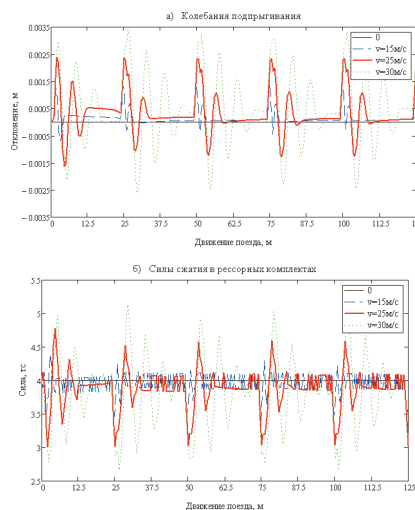


Рисунок 5а,б — Влияние скорости движения поезда на вертикальные колебания:
 скорости — 15, 25, 30 м/с;
 массы обрессоренной части — 16 т;
 коэффициент трения на фрикционной планке — 0,1;
 завывшение клина — 0

ческие силы между колесом и рельсом тем выше, чем короче указанный участок, т. е. происходит избыточное демпфирование обрессоренной массы. К избыточному демпфированию, прежде всего груженого вагона, приводит, в частности, излишнее превышение клиньев $\Delta_{\text{кл}} > 10 \text{ мм}$, особенно в сочетании с завывшенным значением коэффициента трения на фрикционных накладках (значение f_ϕ может достигать величины, равной 0,6). С другой стороны, если затухание не успевает произойти на длине неровности, например на длине рельса, то происходит энергетическая «подпитка» колебательного процесса,

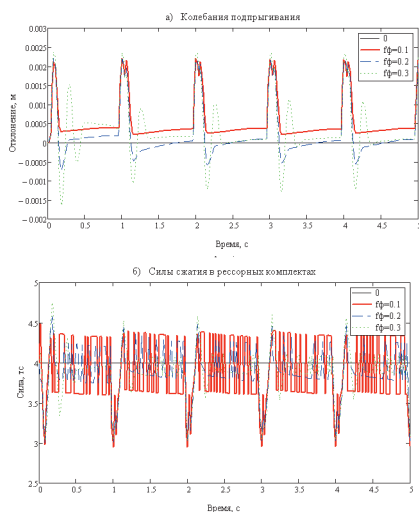


Рисунок 6а,б — Влияние коэффициента трения фрикционной планки на вертикальные колебания:
коэффициенты трения на фрикционной планке — 0,1; 0,2; 0,3;
скорость — 25 м/с;
массы обрессоренной части — 16 т;
завышение клина — 0

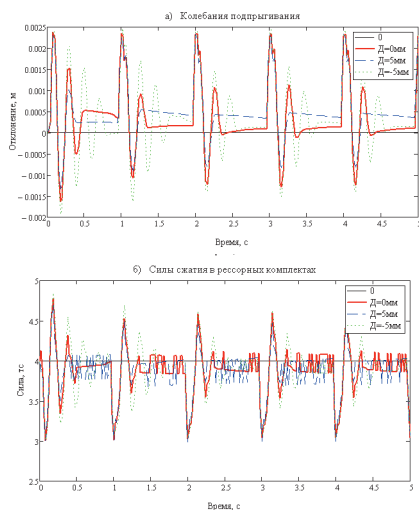


Рисунок 7а,б — Влияние завывшения клина на вертикальные колебания:
завышения клина — 0, 5, -5 мм;
скорость — 25 м/с;
массы обрессоренной части — 16 т;
коэффициент трения на фрикционной планке — 0,1

приводящая к явлению биений, а в конечном счете к повышению уровня вертикальных динамических сил (коэффициентов динамики). В этом случае имеет место недостаточное демпфирование (см. рис. 6). К недостаточному демпфированию, проявляющемуся, как правило, при колебаниях порожних вагонов, приводят и отрицательные значения превышений клиньев ($\Delta_{кл} < 0$), когда $\Delta_{кл} = H_{кл} + \Delta - H_0 < 0 \Rightarrow \Delta < H_0 - H_{кл}$, особенно при изношенных поверхностях контакта. Напомним, что в эксплуатации, как было указано выше, завывшение Δ допускается в диапазоне $\Delta \in (+8, -12)$ мм.

В рассматриваемых примерах принималось, что колебания правого и левого рессорных комплектов синхронны, т. е. получены при одинаковых силовых характеристиках (при одинаковых номинальных значениях высот и упругих характеристик комплектов пружин).

Недостатки существующего способа подбора пружин в рессорные комплекты

Согласно сложившейся практике и действующим нормативным документам [3], подбор рессорных комплектов осуществляется только по высоте пружин, когда пружины в каждом комплекте и по комплектам в тележке по высоте не должны отличаться более чем на 4 мм, а разность высот центральных комплектов пружин под статической нагрузкой не должна превышать 5 мм, т. е. должны выполняться условия:

$$\begin{cases} |l_i - l_j| \leq \Delta l = 4 \text{ мм}; & |l'_i - l'_j| \leq \Delta l' = 4 \text{ мм} \quad (i, j = 1, \dots, 7); \\ |H_{cm}^{(1)} - H_{cm}^{(1)}| \leq \Delta H_{cm} = 5 \text{ мм}; \end{cases} \quad (35)$$

при этом пружины наибольшей высоты устанавливаются под клинья, а количество внутренних пружин с диаметром прутка 19 и 21 мм должно быть одинаковым в обоих комплектах тележки.

Величина завывшения клиньев Δ входит в формулу для величины превышения длины подклиновых пружин $\Delta_{кл}$ в виде

$$\Delta_{кл} = H_{кл} + \Delta - H_0, \quad (36)$$

где эффективные высоты $H_{кл}$, H_0 даны выражениями (2).

Относительно жесткостей пружин C_p , C'_i будем считать, что они задаются (выбираются) случайным образом из диапазонов, указанных в табл. 1 (в предположении нормальности их законов распределения).

На рис. 8—9 представлены результаты моделирования собственных колебаний обрессоренных масс порожнего вагона для некоторых возможных сочетаний пружин в рессорных комплектах, подобранных на основе действующего способа, ориентирующегося только на высоты пружин с ограничениями (35), а жесткости пружин выбирались произвольно из диапазонов, определенных в табл. 1 (их выбор не регламентируется инструкцией). Конкретные значения высот подклиновых пружин $H_{кл}$, высот центрального комплекта пружин (начальной H_0 и статической H_{cm}) и эффективные жесткости $C_{кл}$, C_0 указаны в подрисунковых подписях.

Из рис. 8 видно, что нарушилась синхронность и скорость затухания собственных колебаний левого и правого рессорных комплектов, это привело к возникновению колебаний боковой качки в условиях отсутствия возмущающих воздействий. Из рис. 9 видно, что колебания тех же рессорных комплектов при тех же условиях (что и на рис. 8), но отличающихся только наличием различных завывшений на левом и правом комплектах существенно различны. Так, левый комплект имеет избыточное демпфирование (затухание через 0,5 с), а колебания правого комплекта имеют явно недостаточное демпфирование (затухание через 2,5 с). В реальной эксплуа-

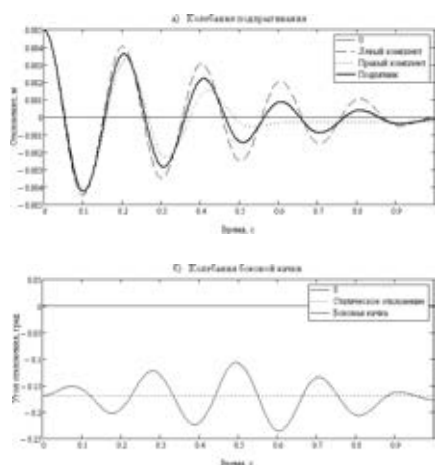


Рисунок 8а, б — Собственные колебания наддрессорной балки:

характеристики комплектов	левый	правый
жесткости подклиновых пружин $C_{кп}$ Н/м	580980,26	482685,99
жесткости основных комплектов $C_{ос}$ Н/м	2413429,95	2904901,3
длины подклиновых пружин $l_{кп}$ м	0,256	0,256
высоты основных комплектов $H_{ос}$ м	0,252	0,256
статические высоты основных комплектов $H_{ст}$ м	0,241	0,246
разность статических высот комплектов ΔH , м	0,005	
завышения (занижения) клина Δ , м	0	0

тации это может привести к повышенным динамическим нагрузкам на левом рессорном комплекте и энергетической подпитке собственных колебаний на правом, а следовательно, и подпитке собственных колебаний подпрыгивания и боковой качки вагона, что чревато возникновением биений и говорит о необходимости учета жесткостей пружин при подборе рессорных комплектов.

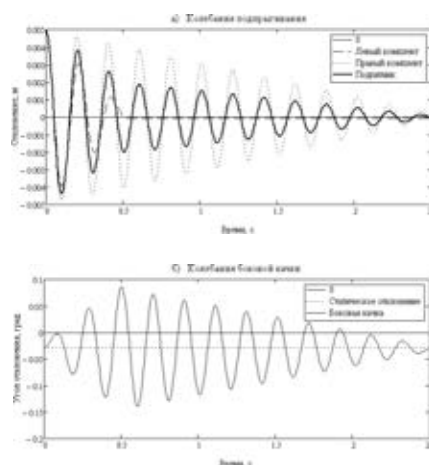


Рисунок 9а, б — Собственные колебания наддрессорной балки:

характеристики комплектов	левый	правый
жесткости подклиновых пружин $C_{кп}$ Н/м	580980,26	482685,99
жесткости основных комплектов $C_{ос}$ Н/м	2413429,95	2904901,3
длины подклиновых пружин $l_{кп}$ м	0,256	0,256
высоты основных комплектов $H_{ос}$ м	0,252	0,256
статические высоты основных комплектов $H_{ст}$ м	0,243	0,244
разность статических высот комплектов ΔH , м	0,001	
завышения (занижения) клина Δ , м	0,002	-0,008

Выводы

1. Предложены критерии качества работы рессорных комплектов тележки типа 18-100 при подборе пружин.

2. Показана необходимость учета не только геометрических параметров пружин, но и непосредственного учета жесткостей пружин в задаче формирования рессорных комплектов тележек.

Литература

1. Автоматизированная линия измерения и сортировки пружин (ЛИСП) : руководство по эксплуатации / НПП «ТОРМО», 2001. 23 с.
2. Францев А.Н. Анализ работы фрикционного узла центрального подвешивания // Вагоны и вагонное хозяйство. 2006. № 3. С. 28.
3. О нормативах содержания ходовых частей грузовых вагонов. Инструкция по ремонту тележек грузовых вагонов РД32ЦВ052-2002 : указания МПС России от 07.08.03 № Н-832у.
4. Конструирование и расчет вагонов : учеб. пособие для вузов ж/д транспорта / Лукин В.В., Шадура Л.А., Котуранов В.Н. и др.; под ред. В.В. Лукина. М. : УМК МПС России, 2000. 731 с.
5. Динамика вагона / Вершинский С.Ф., Данилов В.Н., Челноков И.И. М. : Транспорт, 1978. 352 с.

References

1. Avtomatizirovannaja linija izmerenija i sortirovki pruzhin (LISP) [Automated line of springs' measurement and choice]: Rukovodstvo po ekspluatatsii / NPP «TORMO», 2001. 23s.
2. Frantsev A.N. Analiz raboty friktsionnogo uzla tsentralnogo podveshivaniya [The analysis of fan clutch of bolster suspension] / Vagony i vagonnoe hozjajstvo. 2006. №3. S. 28.
3. Instruksija po remontu telezhek gruzovykh vagonov RD32CV052-2002 [Overhaul manual for freight cars' bogies RD-32CV052-2002]; ukazaniya MPS Rossii «o normativakh sodержaniya hodovykh chastej gruzovykh vagonov» № N-832u ot 07.08.2003g.
4. Konstruirovaniye i raschet vagonov: Uchebnoye posobie dlja vuzov zh/d transporta [Design and calculation of railway cars: Tutorial for railway transport universities] / Lukin V.V., Shadur L.A., Koturanov V.N. i dr.; Pod red. V.V. Lukina, M.: UMC MPS Rossii, 2000. 731 s.
5. Dinamika vagona [Railway car's dynamics] / Vershinsky S.F., Danilov V.N., Chelnokov I.I. M.: Transport, 1978. 352 s.

УДК 639.4.015

Иван Александрович Добычин, доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), главный научный сотрудник ЗАО НПП «ТОРМО»
Михаил Юрьевич Градинаров, научный сотрудник ЗАО НПП «ТОРМО»
Валерий Викторович Трошков, инженер ЗАО НПП «ТОРМО»

МЕТОДИКА ПОДБОРА ПРУЖИН В РЕССОРНЫЕ КОМПЛЕКТЫ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА, ОСНОВАННАЯ НА ДИНАМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЯХ КАЧЕСТВА

Ivan A. Dobychin, DSc, Professor of 'Mechatronics' chair of the Ural State University of Railway Transport, senior staff scientist of Scientific and Industrial enterprise 'Tormo', tel. 89193606502
Mikhail J. Gradinarov, scientific officer (Scientific and Industrial enterprise 'Tormo')
Valeriy V. Troshkov, engineer (Scientific and Industrial enterprise 'Tormo')

Method Of Springs' Selection Into Freight Bogie Spring Group, Based On Dynamic Quality Criteria

Аннотация

Разработана методика подбора пружин в рессорные комплекты тележки грузового вагона, основанная на динамических критериях качества и включающая в себя измерение параметров пружин, произвольную минимальную выборку пружин и формирование из нее двух комплектов пружин путем решения соответствующей системы критериальных уравнений. Проведен сравнительный анализ подбора пружин по действующей и предлагаемой методике.

Ключевые слова: тележка грузового вагона, рессорный комплект, методика подбора пружин, критерии качества.

Annotation

It is developed the method of springs selection into freight bogies spring groups, based on dynamic quality criteria and included the measurement of springs parameters, random minimum springs sampling and formation two spring groups by the method of solving the corresponding system of criterion equations. It is performed the comparative analysis of springs selection by the existing and suggested method.

Key words: freight bogie, spring group, method of springs' selection, quality criteria.

В работе [1] были разработаны критерии качества рессорного комплекта тележки типа 18-100 и обоснована необходимость учета не только геометрических, но и силовых параметров пружин при формировании рессорных комплектов. В данной статье в продолжение указанной работы предложена методика подбора пружин в рессорные комплекты грузовых тележек типа 18-100, основанная на динамическом анализе системы и включающая в себя процедуру оптимизации динамических критериев качества по жесткостям и длинам пружин. Кратко описана программа, реализующая математическое обеспечение предложенной методики.

Измерения параметров пружин и формирование базовых массивов пружин

Важной составной частью предлагаемой методики является измерение параметров пружин, из которых формируется базовый массив внешних и внутренних пружин. Для этих целей хорошо подходит установка АЛИСП [2], которая определяет и коэффициенты жесткости C_p, C'_p и эффективные длины пружин l_p, l'_p .

Отметим также, что АЛИСП еще формирует комплекты пружин для тележек, обеспечивая при этом достаточно малые отклонения высот комплектов под статической нагрузкой. К сожалению, эффективность работы установок АЛИСП не проявляется в полной мере из-за устаревших инструкций, предписывающих формировать рессорные комплекты, ориентируясь только на длину пружин да еще и ограничивая их разброс $(|l_i - l_j| \leq 4 \text{ мм})$ [3]. Об учете реальных жесткостей пружин в действующей инструкции вообще ничего не говорится.

Единая упрощенная методика измерения параметров пружин для рессорных комплектов, предложенная ниже, также может быть реализована на установках АЛИСП.

Из пружин, прошедших процедуру осмотра испытания и измерения (определения) параметров пружин (эффективных длин и жесткостей), формируются базовые массивы пружин, из которых производится случайная выборка

$$\{l, C\} = \{l_i, l'_i; C_i, C'_i, i=1, \dots, n\}, \quad (1)$$

где $n=14k$, k — коэффициент выборки из диапазонов эффективных длин;

$$\begin{cases} \|l_i - l_j\| \leq \Delta_l, \|l'_i - l'_j\| \leq \Delta'_l; \\ \Delta_l = l_i^{\max} - l_i^{\min}, \Delta'_l = l'_i^{\max} - l'_i^{\min}, \end{cases} \quad (2)$$

где Δ_C, Δ'_C — максимально допустимые отклонения длин и диапазонов жесткостей,

$$\begin{cases} \|C_i - C_j\| \leq \Delta_C, \|C'_i - C'_j\| \leq \Delta'_C; \\ \Delta_C = C_i^{\max} - C_i^{\min}, \Delta'_C = C'_i^{\max} - C'_i^{\min}. \end{cases} \quad (3)$$

Минимальный коэффициент выборки $k_{\min}=1$ (означает, что выбрано 14 внешних и 14 внутренних пружин), а максимальное значение $k_{\max}>1$ и ограничено лишь разумными технологическими рамками (в примерах выборка была минимальной: $k=1 \Rightarrow n=14$).

Способ измерения параметров пружин методом деформаций

На рис. 1 представлена схема последовательных деформаций пружины, позволяющих определить эффективные жесткости пружины C_A, C_B на участках, примыкающих к положениям статического равновесия рессорного комплекта при его нагружении обрессоренной массой порожнего (C_A) и груженого (C_B) вагона соответственно, а также эффективные длины (высоты) пружин на этих участках h_A, h_B .

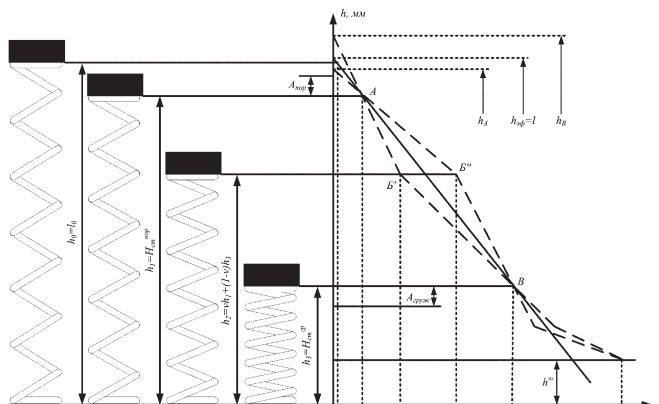


Рисунок 1 — Схема последовательных деформаций пружины

Зададим две основные высоты h_1 и h_3 равными номинальным прогибам рессорных комплектов тележки под действием статических сил тяжести обрессоренных масс порожнего и груженого вагонов соответственно:

$$h_1 = H_{cm}^{nop}; h_3 = H_{cm}^{cp}, \quad (4)$$

а промежуточную высоту h_2 выберем в виде

$$h_2 = \nu h_1 + (1 - \nu) h_3, \quad (5)$$

где $H_{cm}^{nop}, H_{cm}^{cp}$ — некоторые средние значения статических прогибов рессорных комплектов, принятые за номинальные (про-

ектные), а ν — коэффициент взвешивания, выбираемый по принципу предпочтения или значимости.

Например, отдавая некоторое предпочтение H_{cm}^{nop} (т. е. h_1), можно положить:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{m_{обp}^{cp}}{m_{обp}^{nop} + m_{обp}^{cp}} \approx \frac{m_{обp}^{cp}}{m_{обp}^{nop} + m_{обp}^{cp}} (\approx 0,8); \\ (m_{обp}^{cp} &\approx 68m, m_{обp}^{nop} \approx 16,8m). \end{aligned} \quad (6)$$

В случае отсутствия предпочтений следует положить $\nu=1/2$.

После замера усилий P_1, P_2, P_3 при сжатии пружины до заданных высот h_1, h_2, h_3 соответственно найдем три значения коэффициента жесткости пружины:

$$C_{12} = \frac{P_2 - P_1}{h_1 - h_2}; C_{23} = \frac{P_3 - P_2}{h_2 - h_3}; C_{13} = \frac{P_3 - P_1}{h_1 - h_3}. \quad (7)$$

С учетом (7) определим три значения эффективной длины пружины:

$$l_{12} = \frac{P_2 h_1 - P_1 h_2}{P_2 - P_1}; l_{23} = \frac{P_3 h_2 - P_2 h_3}{P_3 - P_2}; l_{13} = \frac{P_3 h_1 - P_1 h_3}{P_3 - P_1}. \quad (8)$$

Замером усилия P_0 на «высоте»

$$H_{cm}^{nop} + A_{nop} = h_0, \quad (9)$$

где A_{nop} — номинальная амплитуда колебаний подпрыгивания обрессоренной массы порожнего вагона, контролируется условие того, что в процессе колебаний пружина не будет болтаться (будет все время поджата). Указанное условие можно записать в виде

$$P_0 \geq P_0^*, \quad (10)$$

где P_0^* — некоторое пороговое значение усилия, указывающее, что пружина сжимается.

Далее проверяем близость измеренных значений коэффициентов жесткости $\tilde{N}_{12}$ и $\tilde{N}_{23}$ по условию

$$|C_{12} - C_{23}| = \left| \frac{P_2 - P_1}{h_1 - h_2} - \frac{P_3 - P_2}{h_2 - h_3} \right| \leq \Delta_C, \quad (11)$$

где Δ_C — допустимое отклонение.

Если условие (11) выполнено, то принимаем единую жесткость пружины в виде

$$C = \frac{C_{12} + C_{23}}{2} \text{ или } C = \frac{C_{12} + C_{23} + C_{13}}{3}, \quad (12)$$

а если не выполнено, то принимаем отдельно: для порожнего вагона $C = C_{12}$, а для груженого $C = C_{23}$.

В общем виде:

$$C = \begin{cases} \frac{C_{12} + C_{23}}{2}, & \text{при } |C_{12} - C_{23}| \leq \Delta_C; \\ \begin{cases} C^{nop} & \text{в зоне } H_{cm}^{nop} \pm A_{nop} \\ C^{cp} & \text{в зоне } H_{cm}^{cp} \pm A_{cp} \end{cases} & \text{при } |C_{12} - C_{23}| > \Delta_C, \end{cases} \quad (13)$$

где $C^{nop} = C_{12}$; $C^{cp} = C_{23}$.

Аналогично для эффективной длины пружины:

$$l = \begin{cases} \frac{l_{12} + l_{23}}{2}, & \text{при } |C_{12} - C_{23}| \leq \Delta_C; \\ \begin{cases} l^{nop} & \text{в зоне } H_{cm}^{nop} \pm A_{nop} \\ l^{cp} & \text{в зоне } H_{cm}^{cp} \pm A_{cp} \end{cases} & \text{при } |C_{12} - C_{23}| > \Delta_C. \end{cases} \quad (14)$$

Но, скорее всего (при $|l_{12} - l_{21}| \leq \Delta_l$), можно принять

$$l = \frac{l_{12} + l_{23}}{2} \text{ или } l = \frac{l_{12} + l_{23} + l_{13}}{3}. \quad (15)$$

Если на практике окажется, что устойчиво выполнены условия $|C_{12} - C_{23}| \leq \Delta_C$, $|l_{12} - l_{23}| \leq \Delta_l$, то достаточно принять единые значения для эффективной длины l и эффективной жесткости C :

$$\begin{cases} l \approx l_{13} = \frac{P_3 h_1 - P_1 h_3}{P_3 - P_1} = \frac{P_3 H_{cm}^{cp} - P_1 H_{cm}^{nop}}{P_3 - P_1}; \\ C \approx C_{13} = \frac{P_3 - P_1}{h_1 - h_3} = \frac{P_3 - P_1}{H_{cm}^{nop} - H_{cm}^{cp}}. \end{cases} \quad (16)$$

В методике измерения параметров пружин методом деформаций можно принять $H_{cm}^{nop} = 240 \text{ мм}$; $H_{cm}^{cp} = 200 \text{ мм}$; $A_{nop} = 5 \div 8 \text{ мм}$; $\nu = 0,8$, т. е. $h_0 = 245 \div 248 \text{ мм}$; $h_1 = 240 \text{ мм}$; $h_3 = 200 \text{ мм}$; $h_2 = \nu h_1 + (1 - \nu) h_3 = 0,8 * 240 + 0,2 * 200 = 232 \text{ мм}$.

Для P_0 можно принять, например, $P_0 = 0,1 P_1 \approx 0,1 C_{ном} \lambda_{cm}^{nop}$, где λ_{cm}^{nop} — статический прогиб рессорного комплекта порожнего вагона ($\lambda_{cm}^{nop} \approx 10 \text{ мм}$), C — номинальная (проектная) жесткость пружин.

Способ измерения параметров пружин методом нагружений

Этот способ отличается от предыдущего тем, что усилия нагружения P_0, P_1, P_2, P_3 задаются, а высоты пружины под нагрузками h_0, h_1, h_2, h_3 замеряются.

В основе также лежат соотношения (7) и (8) для определения эффективных жесткостей и эквивалентных длин пружины, из которых следуют рабочие формулы (12)–(16).

В качестве задаваемых величин $P_0 - P_3$ можно принять:

$$\begin{cases} P_0 = 0,1 P_{cm}^{nop}; & P_1 = P_{cm}^{nop}; & P_2 = P_{cm}^{cp}; \\ P_2 = \nu P_1 + (1 - \nu) P_3; & \nu = \frac{m_{бр}^{cp}}{m_{бр}^{nop} + m_{бр}^{cp}}, \end{cases} \quad (17)$$

где проведен пересчет на одну пружину (наружную или внутреннюю).

Например, для наружных пружин:

$$\begin{aligned} P_0 &= 38 \text{ кгс} = 0,37 \text{ кН}; & P_1 &= 380 \text{ кгс} = 3,73 \text{ кН}; \\ P_2 &= 684 \text{ кгс} = 6,7 \text{ кН}; & P_3 &= 1900 \text{ кгс} = 18,65 \text{ кН}; \end{aligned}$$

для внутренних пружин:

$$\begin{aligned} P_0 &= 16 \text{ кгс} \approx 0,155 \text{ кН}; & P_1 &= 160 \text{ кгс} \approx 1,56 \text{ кН}; \\ P_2 &= 288 \text{ кгс} \approx 2,83 \text{ кН}; & P_3 &= 800 \text{ кгс} \approx 7,8 \text{ кН}. \end{aligned}$$

В АЛИСП практически снимается зависимость $P \leftrightarrow h$, т. е. зависимость $P = P(h)$ по 20 точкам. Поэтому реализация на

АЛИСП описанных выше способов (метод деформаций и метод нагружений) не представляет трудностей.

В настоящее время зависимость $P = P(h)$ реализуется в линейной форме в виде

$$P = C(l_0 - h). \quad (18)$$

В целом зависимость вида (18) подтверждается опытом работы на АЛИСП.

Представляется целесообразным зависимость (18) проверить на двух участках около $h_1 = H_{cm}^{nop}$ и $h_2 = H_{cm}^{cp}$ т. е.

$$P_1 \approx C^{nop}(H_{cm}^{nop} - h) \text{ и } P_2 \approx C^{cp}(H_{cm}^{cp} - h), \quad (19)$$

на предмет близости $C \approx C^{nop} \approx C^{cp}$, т. е.

$$|C^{nop} - C^{cp}| \leq \Delta_C \text{ или } \left| \frac{P_1}{h_1} - \frac{P_2}{h_2} \right| \leq \Delta_C. \quad (20)$$

Критерии подбора пружин в рессорные комплекты отдельной тележки и система критериальных уравнений

В качестве основных критериальных параметров (критериев) рессорных комплектов используем H_{cm} , S_0 , Ψ , предложенные в работе [1].

Напомним:

H_{cm} — высота рессорного комплекта под статической нагрузкой от обрессоренной массы m , определяемая по формуле (4) работы [1],

$$H_{cm} = H_0 - \frac{mg - C_{кл}(H_{кл} - H_0 + \Delta)}{C_0 + C_{кл}};$$

S_0 — ширина полосы застоя (полосы положений статического равновесия обрессоренной массы m с учетом сил трения на фрикционных планках), определяемая по формуле (16) работы [1],

$$S_0 = \frac{C_{кл}(\varphi_n + \varphi_p)[mg + C_0(H_{кл} + \Delta - H_0)]}{[C_{кл}(1 + \varphi_n) + C_0][C_{кл}(1 - \varphi_p) + C_0]};$$

Ψ — коэффициент поглощения энергии (коэффициент поглощения), определяемый по формуле (20) работы [1],

$$\Psi = \frac{C_{кл}(\varphi_n + \varphi_p)(S_0 + \lambda_{кл})}{C_{кл}(2 + \varphi_n - \varphi_p)(S_0 + \lambda_{кл}) + C_0(\varphi_n + \varphi_p)(2S_0 + \lambda_0)}.$$

Параметры H_{cm} , S_0 , Ψ определяются формулами (4), (16) и (20) работы [1] соответственно и представляют собой функционалы на множестве пружин $\{l, C\}$, определенном равенствами (1)–(3):

$$\begin{cases} H_{cm} = H_{cm}(l, C; m, \Delta, f_\phi, f, \alpha), \\ S_0 = S_0(l, C; m, \Delta, f_\phi, f, \alpha), \\ \Psi = \Psi(l, C; m, \Delta, f_\phi, f, \alpha), \end{cases} \quad (21)$$

где m — обрессоренная масса;

$\Delta = (\Delta' + \Delta'')/2$ — среднее завывшение клиньев рессорного комплекта;

f_ϕ, f — коэффициенты трения;

α — угол наклонной площадки клина.

Дополнительно в качестве критериального параметра введем время остановки $t_{ост}$ (время собственных колебаний),

определяемое равенством (18) работы [1], и потребуем выполнения равенства:

$$t_{ocm} = \gamma_0 t_p^{\min}, \quad t_p^{\min} = L / v_3^{\max}, \quad (22)$$

где $t_p^{\min}$ — минимальное время прохождения длины рельса L (длина характерной неровности) с максимально допустимой эксплуатационной скоростью $v_3^{\max}$;

γ_0 — коэффициент плавности ($\gamma_0 = 0,8 \div 0,9$).

Из равенств (22) и (18) работы [1] получаем критериальное значение для ширины полосы застоя S_0^* в виде

$$S_0^* = \frac{\tau_0 A_0}{2\gamma_0 L v_3 - \tau_0}, \quad (23)$$

где учтено, что $\tau \approx \tau_0$ (13) работы [1], а A_0 — максимальное отклонение обрессоренной массы m от положения статического равновесия, возможное при неровностях рельсов, описываемых функциями вида (31), (32) работы [1] при движении со скоростью $v_3^{\max}$.

Задача оптимального подбора пружин в два рессорных комплекта одной отдельной тележки заключается в решении на множества $\{I, C\}$ (1)–(3) следующей системы критериальных уравнений:

$$\begin{cases} \Delta_H = |H_{cm}^{(1)} - H_{cm}^{(2)}| = \min_{I,C}; \\ \Delta_\Psi = |\Psi^{(1)} - \Psi^{(2)}| = \min_{I,C}; \\ \Delta_S^v = |S_0^{(v)} - S_0^{(*)}| = \min_{I,C}, \quad (v=1,2) \end{cases} \quad (24)$$

с условием:

$$\begin{cases} \Delta_H \leq \Delta_H^*; \\ \Delta_\Psi \leq \Delta_\Psi^*, \end{cases} \quad (25)$$

где Δ_H^* , Δ_Ψ^* — заданные критериальные (регламентируемые) значения отклонений величин H_{cm} и Ψ для правого и левого рессорных комплектов.

При решении задачи (24)–(25) сначала берем минимальную выборку пружин при $k=k_0=1$ ($n_0=14k_0$) и, решив уравнения (24), проверяем условия (25). Если условия (25) не выполняются, то увеличиваем размер выборки до $k_1 > k_0 + \Delta_k$ (где Δ_k — шаг увеличения выборки; при этом $n_1=14k_1$) и снова проверяем условия (25). Процедура повторяется до тех пор, пока не будут выполнены условия (25). Пробные расчеты показали, что даже минимальная выборка дает хорошие результаты.

При реализации алгоритмов подбора комплектов можно отдавать предпочтение, вводя весовые коэффициенты, либо разности высот комплектов Δ_H , либо разности коэффициентов поглощения Δ_Ψ .

Примеры подбора пружин по новой методике и сравнение с действующей

На рис. 2, 3 представлены результаты моделирования собственных колебаний обрессоренных масс порожнего вагона для сочетаний пружин, предложенных в предыдущей статье (см. рис. 8, 9), расставленных в соответствии с действующим способом (ориентируясь только на длины пружин) и по предлагаемой методике (с учетом длин и жесткостей пружин). На рис. 4 приведен результат моделирования для случайно подобранного комплекта пружин (табл. 1). На рис. 5 также показаны результаты моделирования колебаний обрессоренных масс, но было снято первое из ограничений (35) работы [1]

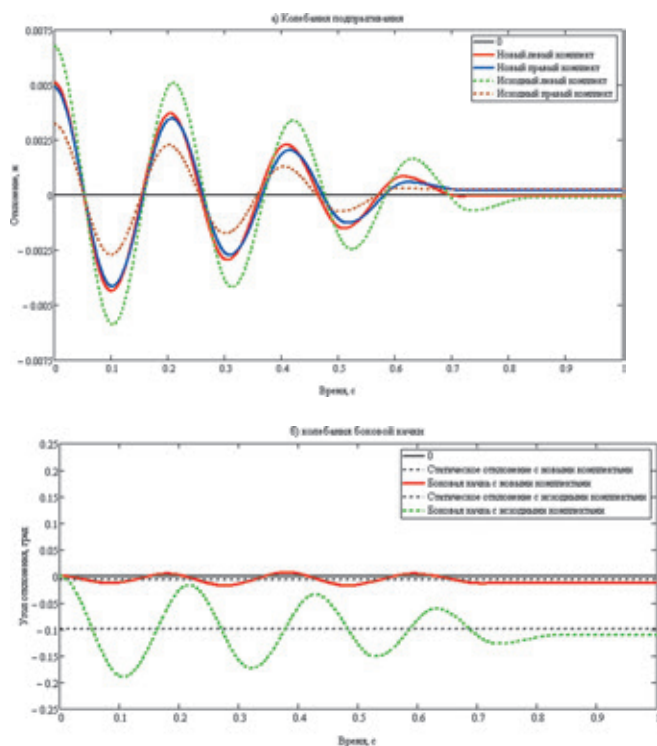


Рисунок 2а, б — Собственные колебания надрессорной балки

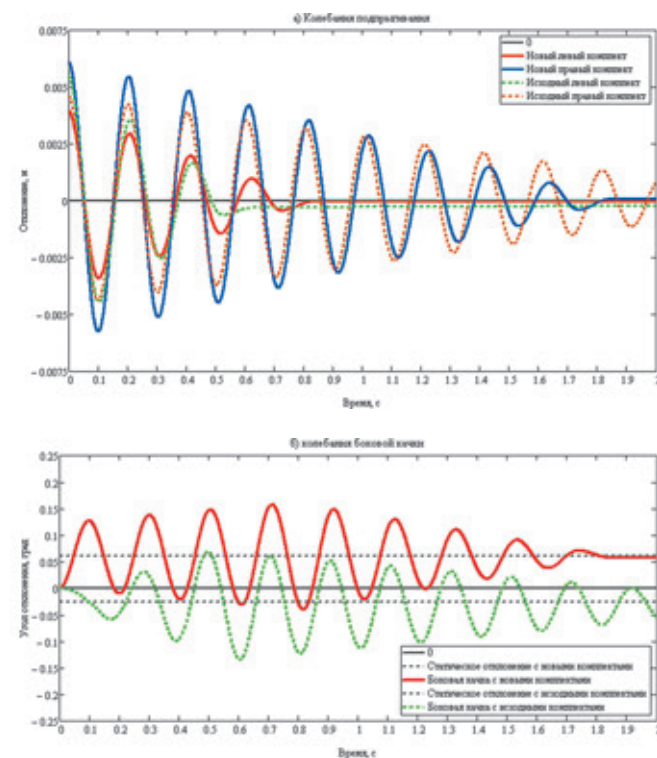


Рисунок 3а, б — Собственные колебания надрессорной балки

— разность высот пружин в одном комплекте не превышает 4 мм (выбор делался из всех возможных пружин, см. табл. 1 в работе [1]). В табл. 1 представлены характеристики исходных комплектов со случайным выбором пружин в соответствии с действующей методикой подбора пружин [3] и характеристика комплекта, подобранного по предлагаемой методике из того же набора пружин.

Как видно из рис. 4, 5 и табл. 1, предлагаемая методика расстановки пружин в рессорных комплектах тележки грузового вагона позволяет избавиться от дополнительных ограничений на разность высот пружин в комплекте без ухудшения динамических характеристик тележки. Более того, было проведено моделирование для 30 случайно выбранных комплектов, расставленных по обоим рассматриваемым методикам (действующей и предлагаемой) с использованием ограничения по разбросу длин в комплекте и без него. В результате с помощью предлагаемой методики для комплектов с данным ограничением на разность длин пружин в комплекте удалось уменьшить разность статических высот левого и правого комплектов Δ_H в среднем на 98,4%, разность коэффициентов поглощения Δ_Ψ на 87,5%, коэффициент устойчивости против схода с рельса $k_{y.k.}$ на 16,2%; а без него Δ_H на 99,5%, Δ_Ψ на 90,4%, а $k_{y.k.}$ на 23,4%. Таким образом,

подбор рессорных комплектов из всего множества пружин, но с учетом их жесткостей дает лучшие результаты, а также позволяет лучше компенсировать разность завышений/занижений клиньев.

По предложенной методике подбора рессорных комплектов с учетом силовых характеристик пружин были сформированы комплекты для грузовых платформ «Трансконтейнера». В результате после пробега 250 тыс. км осмотр показал, что фрикционные клинья и колесные пары имеют равномерный износ в пределах допустимых норм.

Разработанный алгоритм и процедура формирования рессорных комплектов реализованы в компьютерной программе, которая может входить в программное обеспечение АЛИСП.

Выводы

1. Разработана методика подбора пружин в рессорные комплекты тележки типа 18-100, основанная на динамических критериях качества работы рессорных комплектов.

2. Разработанная методика позволяет подбирать комплекты из всего имеющегося диапазона разброса характеристик пружин (без дополнительных ограничений по высоте), что дополнительно позволяет смягчить требования по выбраковке пружин по высоте.

Таблица 1 — Сравнения действующего и предлагаемого метода подбора пружин в рессорные комплекты

Ограничения на разность высот пружин в комплекте, мм			4 (рис. 4)		(рис. 5)			
Метод расстановки пружин в комплекте			Действующий	Предлагаемый	Действующий	Предлагаемый		
Эквивалентные жесткости сдвоенных пружин, Н/м	Левый комплект	Подклиновые	594818,9 555516,9	594818,9 555111,2	637973,9 648030,9	637973,9 623679,9		
		Основной комплект	618790,9 628530,2 621293,8 598873,3 580107,7	555516,9 589636,6 650858,0 621293,8 598873,3	595102,5 604939,9 628622,9 623517,3 578861,5	569025,8 595102,5 628622,9 610674,6 578861,5		
			Правый комплект	Подклиновые	605720,7 650858,0	604087,9 591961,7	558544,3 585461,7	604939,9 558544,3
				Основной комплект	604087,9 589636,6 555111,2 590713,6 591961,7	580107,7 605720,7 628530,2 618790,9 590713,6	610674,6 582129,7 623679,9 545820,1 569025,8	585461,7 623517,3 582129,7 545820,1 648030,9
	Левый комплект				Подклиновые	251,1 250,7	251,1 251,4	255,4 255,1
		Основной комплект			250,5 250,2 249,8 249,3 249,2	250,7 251,8 252,7 249,8 249,3	253,7 253,6 253,1 251,1 249,9	249,2 253,7 253,1 252,3 249,9
			Правый комплект		Подклиновые	252,8 252,7	251,8 250,0	252,7 252,7
				Основной комплект	251,8 251,8 251,4 251,4 250,0	249,2 252,8 250,2 250,6 251,4	252,3 250,4 249,9 249,4 249,2	252,7 251,1 250,4 249,4 255,1
Разность статических высот комплектов Δ _н , мм					1,59	0,01	2,74	0,01
Разность коэффициентов поглощения комплектов Δ _ψ					0,067	0,005	0,026	0,003
Коэффициент устойчивости колесной пары против схода с рельсов k _{ук}			0,935		1,118	0,726	1,130	

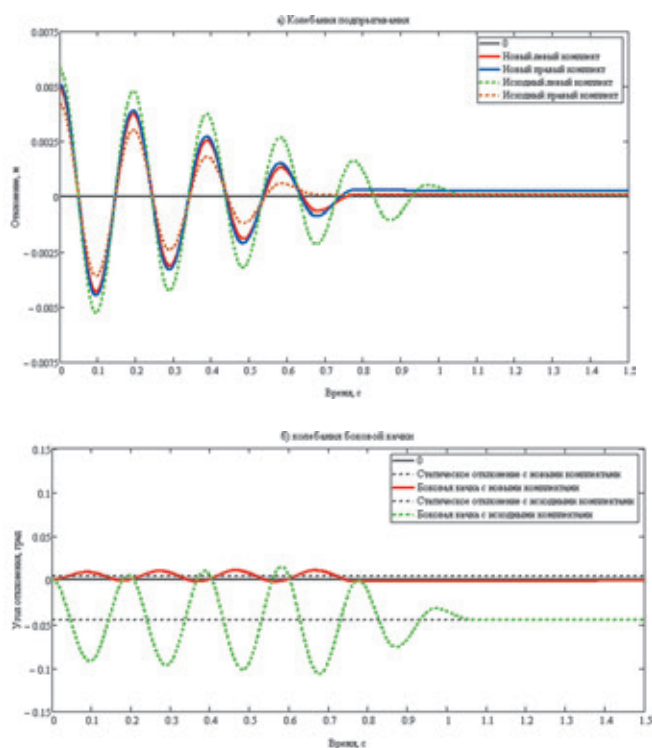


Рисунок 4а, б — Собственные колебания наддрессорной балки

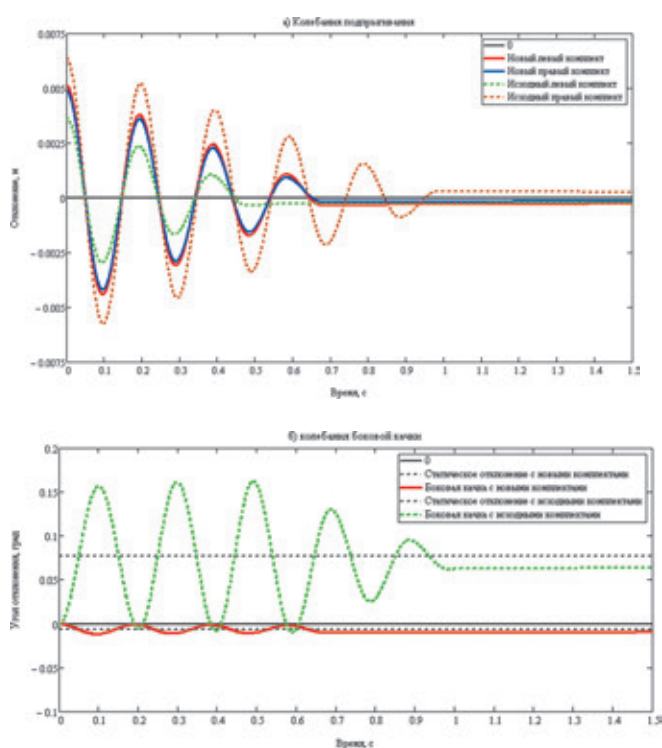


Рисунок 5а, б — Собственные колебания наддрессорной балки

Литература

1. Добычин И.А., Градинаров М.Ю., Трошков В.В. Задачи формирования рессорных комплектов тележек грузовых вагонов путем подбора пружин по силовым и геометрическим параметрам // Транспорт Урала. 2012. № 1 (32). С. 43 — 49
2. Автоматизированная линия измерения и сортировки пружин (ЛИСП) : руководство по эксплуатации / НПП «ТОРМО», 2001. 23 с.
3. «О нормативах содержания ходовых частей грузовых вагонов». Инструкция по ремонту тележек грузовых вагонов РД32ЦВ052-2002 : указания МПС России от 07.08.03 № Н-832у.

References

1. Dobychin I.A., Gradinarov M.Ju., Troshkov V.V. Zadachi formirovaniya resstroykh komplektov telezhok gruzovykh vagonov putem podbora pruzhin po silovym i geometricheskim parametram [Tasks of forming freight bogies' spring groups by springs' selection according to force and geometric parameters] // Transport Urala. 2012, №1 (32). S.
2. Avtomatizirovannaya liniya izmerenija i sortirovki pruzhin (LISP) [Automated line of springs measuring and picking] : Rukovodstvo po ekspluatatsii / NPP «ТОРМО», 2001. 23 s.
3. Instruksija po remontu telezhok gruzovykh vagonov RD32CV052-2002 [Overhaul manual for freight bogies RD-32CV052-2002]; ukazaniya MPS Rossii «O normativakh sodержaniya hodovykh chastej gruzovykh vagonov» № N-832u ot 07.08.2003g.

УДК 517.53:656.2.001

Константин Олегович Долгих, аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Василий Федорович Лапшин, доктор технических наук, профессор Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА

Konstantin O. Dolgykh, PhD student of "Railway cars" department, The Ural State University of Railway Transport
Vasily F. Lapshin, DSc, prof. of "Railway cars" department, The Ural State University of Railway Transport

Identification Of Mathematical Model Parameters Of An Open Car Body Vibroloading

Аннотация

В работе сформулирована экспериментально-расчетная методика параметрической идентификации математической модели вибронагруженности кузова полувагона. Методика предназначена для повышения точности результатов моделирования с использованием показателей затухания колебаний в элементах конструкции вагона. Выполнена проверка методики на примере нагружения вынуждающей силой вибромашины кузова полувагона модели 12-132, которая подтвердила высокую точность расчетных значений напряжений. Разработанная методика может быть использована в процедурах проектирования вагонов, а также разработки требований по обеспечению их сохранности при производстве разгрузочных работ.

Ключевые слова: полувагон, вибронагруженность, внутреннее трение в материале конструкции, математическая модель, методика идентификации характеристик, полномасштабный эксперимент, численный эксперимент, логарифмический декремент затухания, матрица демпфирования.

Annotation

Calculation method for parametric identification of vibroloading mathematical model of an open car body is stated. The method should improve results' accuracy of simulation with the use of oscillation damping factors in structural elements of a railway car. The method is checked on the example of loading by driving force of a vibromachine of an open car body of a model 12-132 that proves high accuracy of tension's estimated value. The method can be used in railway cars' design and requirements development for their safety during unloading.

Key words: open car, vibroloading, internal friction in construction, mathematical model, method of parameters' identification, full-scale experiment, numerical experiment, logarithmic damping decrement, damping matrix parameters.

Математическая модель вибронагруженности кузова полувагона [1, 2] имеет сложную структуру и содержит большое число неизвестных функциональных параметров. Определение этих параметров представляет сложную задачу, основанную на методе идентификации [3]. В данном случае под идентификацией модели будем понимать процедуру выбора переменных модели с последующей их оценкой на основе статистических данных, полученных в результате натурного эксперимента.

Остановимся подробнее на *актуальности* данного вопроса в рамках рассматриваемой задачи. Математическая модель вибронагруженности означает математическое описание динамики поведения упругой системы при гармоническом нагружении вынуждающей силой вибромашины во временной области (1)

$$[M] \cdot \{\ddot{\vec{q}}\} + [D] \cdot \{\dot{\vec{q}}\} + [C] \cdot \{\vec{q}\} = \{\vec{Q}(t)\}, \quad (1)$$

где $[M]$ — матрица масс;

$[D]$ — матрица демпфирования;

$[C]$ — матрица жесткостей;

$\{\ddot{\vec{q}}\}$ — вектор узловых ускорений;

$\{\dot{\vec{q}}\}$ — вектор узловых скоростей;

$\{\vec{q}\}$ — вектор узловых перемещений;

$\{\vec{Q}(t)\}$ — вектор внешних нагрузок, изменяющихся во времени по гармоническому закону.

Диагональная матрица демпфирования $[D]$ учитывает внутреннее трение в материале конструкции кузова вагона. Природа затухания колебаний обычных конструкций, подобных кузову вагона, очень сложна и зависит не только от характера внешних нагрузок, но и от температуры упругого тела, его химического состава, кристаллической структуры, величины зерна и т. д.

Для большинства задач при решении полной системы уравнений (1) математическая модель сил демпфирования строится, как правило, на основе диссипативной функции Рэлея [4]. В этом случае матрица демпфирования состоит из двух слагаемых: одно пропорционально матрице масс, другое — пропорционально частоте колебаний (2)

$$[D] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [C], \quad (2)$$

где коэффициенты α, β выбираются в зависимости от характеристик материала.

Коэффициенты пропорциональности задаются, как правило, из условия равенства демпфирования по Релею и коэффициента амплитудно-зависимого демпфирования на доминирующей собственной частоте.

Как показано в работах [5, 6], в случае построения решения в упругой области путем аппроксимации малых упругих перемещений тела по допустимым собственным формам колебаний подсистемы существует более удобный способ задания матрицы демпфирования $[D]$. Свободные колебания подсистемы можно рассматривать как набор независимых уравнений движения систем с одной степенью свободы. Тогда коэффициенты диагональной матрицы демпфирования $[D]$ можно представить в следующем виде:

$$d_{kk} = 2\gamma\mu_{\omega_k}, \quad (3)$$

где $\gamma > 0$ — коэффициент неупругого сопротивления;
 $k = 1, 2, \dots, n$ — форма колебаний.

Вид соотношений, учитывающих внутреннее трение в материале конструкции, может быть разным, в зависимости от того, в какой форме демпфирование присутствует в интерфейсе программы — в виде коэффициента затухания колебаний, относительного демпфирования, неупругого сопротивления, логарифмического декремента затухания колебаний и др. Но при этом для адекватного отображения процессов является обязательным учет эффекта внутреннего трения.

Как показал анализ ранее выполненных работ, существует несколько способов определения внутреннего трения в материале конструкций: по затуханию свободных колебаний, по резонансной кривой, по относительному рассеянию упругой энергии за один период колебаний.

На основании вышесказанного *цель* данной работы — разработка методики идентификации характеристик затухания колебаний в модели вибронгруженности полувагона, включающей этапы идентификации и верификации идентифицированной модели.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие *задачи*:

- разработать экспериментально-расчетную методику идентификации параметров модели вибронгруженности на основе данных о характеристиках затухания колебаний, полученных на реальных образцах при натурных испытаниях;
- показать возможность идентификации параметров модели вибронгруженности кузова полувагона по предложенной методике, используя экспериментально определенные характеристики затухания колебаний в элементах кузова;

- верифицировать модель с идентифицированными параметрами затухания путем определения величины отклонений расчетных значений амплитуды колебаний от экспериментальных, полученных при нагружении кузова полувагона гармонической вынуждающей силой накладной вибромашины.

Методы и средства исследования:

- методы численного решения систем обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений; методы электротензометрии;
- программные аналитические продукты ANSYS, UMW; лабораторное оборудование: измерительная система Spider-8 с программным обеспечением Catman;
- оценка адекватности математической модели вибронгруженности кузова полувагона с идентифицированными параметрами затухания выполнялась сопоставлением прогнозируемых расчетных показателей с экспериментальными данными.

Объект и предмет исследования: полувагон модели 12-132; характеристики затухания колебаний: логарифмический декремент затухания δ .

Методика идентификации параметров математической модели

Процедура параметрической идентификации сводится к отысканию значений параметров α, β матрицы демпфирования (2) математической модели (1), которые обеспечивают максимальную близость выходных расчетных δ_p и экспериментальных $\delta_{\text{эк}}$ значений при одинаковых входных параметрах.

В качестве критерия количественной меры адекватности математической модели используются максимальные $J_{\max}$, средние J_m и среднеквадратические J_{σ} величины погрешностей рассогласования расчетных δ_p и экспериментальных $\delta_{\text{эк}}$ значений:

$$J_{\max} = \max |\delta_p - \delta_{\text{эк}}|; \quad (4)$$

$$J_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\delta_{pk} - \delta_{\text{эк}k}); \quad (5)$$

$$J_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\delta_{pk} - \delta_{\text{эк}k})^2}, \quad (6)$$

где k — количество измерений.

Поиск значений идентифицируемых параметров выполнялся в два этапа. На первом этапе задавалось начальное значение α, β и определялось направление поиска в большую или меньшую сторону от начальных значений параметров. На втором этапе выполнялась процедура итерационного приближения расчетных значений параметров к экспериментальным. Окончанием итерационного поиска служило требование $J \leq \varepsilon$ с проверкой условия по ряду элементов кузова (верхняя обвязка, нижняя обвязка, шкворневая стойка, верхний лист обшивки, нижний лист обшивки). Значение ε , определяющее уровень ошибки идентификации, принималось равным $\varepsilon = 0,1 \cdot \delta_{\text{эк}}$.

Блок-схема алгоритма идентификации параметров математической модели вибронгруженности представлена на рис. 1.

Результаты идентификации параметров математической модели

Исходными данными для определения α , β в выражении (1) являются записи затухающих колебаний в элементах конструкции кузова после снятия вынуждающей гармонической силы вибровозбудителя. Согласно алгоритму идентификации была разработана гибридная модель «вибромашина — кузов полувагона — тележка» [2]. В результате решения математической модели методом Парка получены графики временных зависимостей динамических напряжений, возникающих в обшивке и несущих элементах кузова после снятия вибрационной машины с вагона. В качестве

примера на рис. 2 приведены расчетные виброграммы затухающих колебаний в элементах кузова полувагона модели 12-132.

Экспериментальные значения для процедуры идентификации получены в результате натурального эксперимента по нагружению полувагона вынуждающей силой вибромашины. Эксперимент проводился на разгрузочной площадке ОАО «Святогор» по программе-методике, изложенной в «Программе испытаний полувагона от действия накладной вибромашины. 23ВИ.636.01-2011 ПМ». В качестве объекта испытаний был использован полувагон модели 12-132 № 56580103 постройки ОАО «НПК Уралвагонзавод» и находящийся в собственности

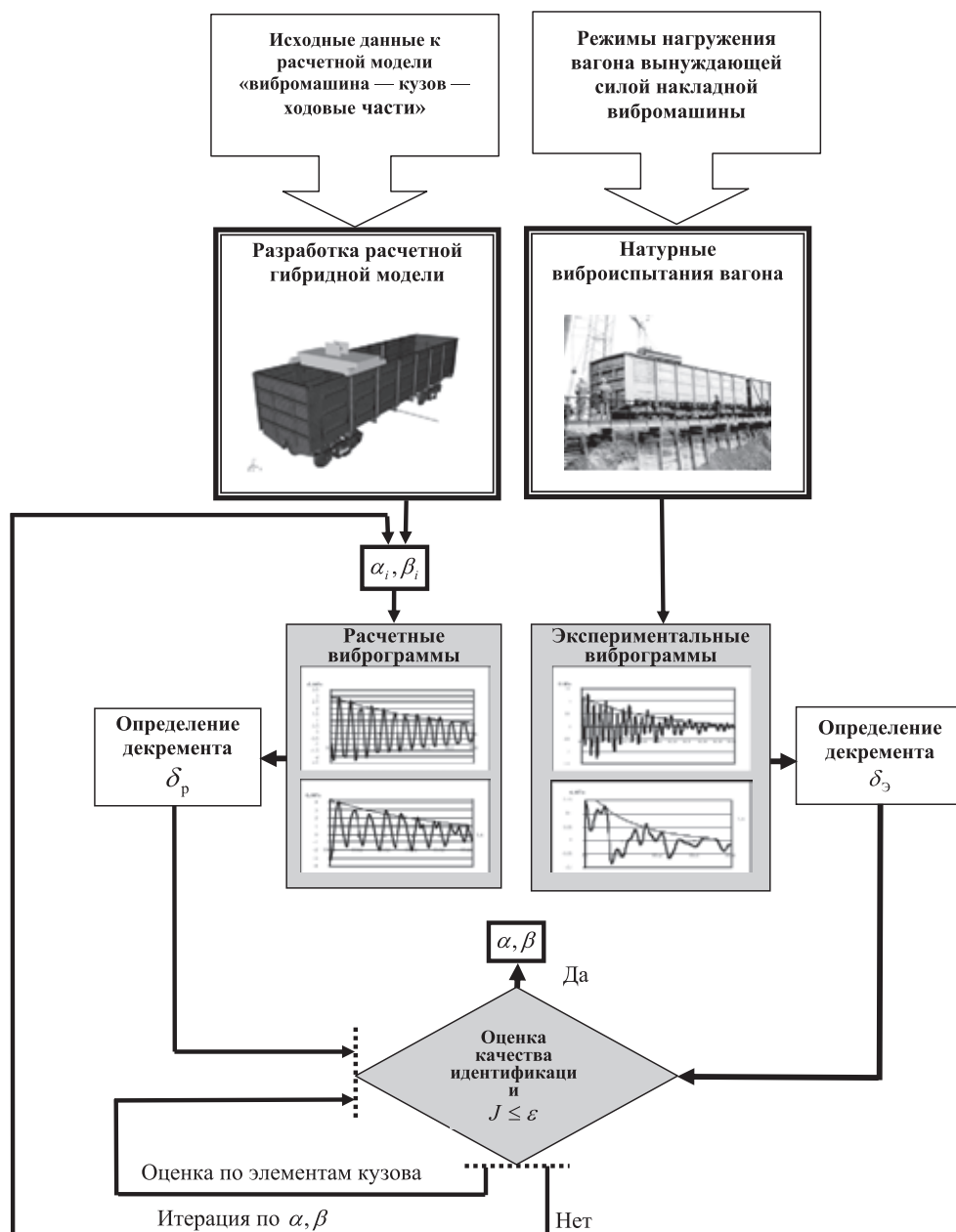


Рисунок 1 — Блок-схема идентификации параметров модели вибронегруженности кузова полувагона

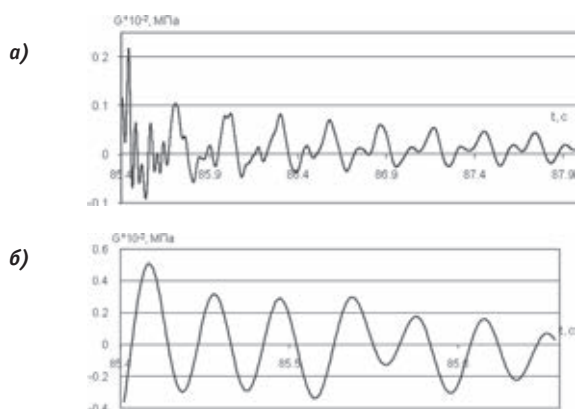


Рисунок 2 — Расчетные виброграммы затухающих колебаний в элементах кузова: а) обшивка в зоне среднего гофра; б) нижняя полка верхней обвязки

ЗАО «Алькон». Вибронагружение производилось вибромашиной ДП-32 УХЛ, реализующей частоту нагружения 24 Гц и амплитуду вынуждающей силы 88 кН. Масса вибромашины 7500 кг, длина опорных элементов взаимодействующих с верхней обвязкой — 2,5 м. Для регистрации колебаний на элементы кузова наклеивались тензорезисторы базой 20 мм, сопротивлением 200 Ом. Схема наклейки датчиков на боковую стену полувагона и фрагменты записи затухающих колебаний для определения декремента затухания колебаний представлены на рис. 3.

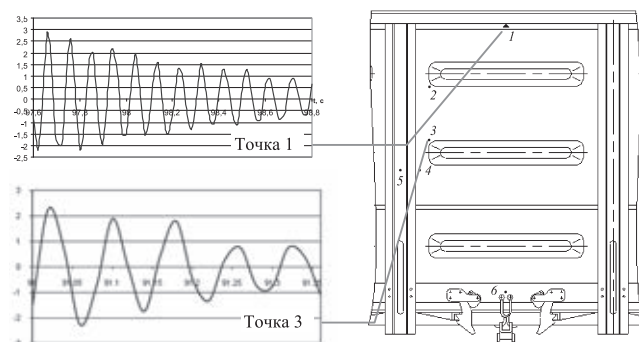


Рисунок 3 — Схема наклейки тензорезисторов и фрагменты записи затухающих колебаний

Характеристики затухания колебаний в элементах кузова определялись по выражению для логарифмического декремента затухания колебаний

$$\delta = \frac{1}{k} \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}, \quad (7)$$

где k — число периодов на виброграмме;
 A_n — амплитуда колебаний в начале участка;
 A_{n+1} — амплитуда колебаний в начале участка.

Анализ виброграмм, полученных в результате натурных испытаний полувагона, показал, что на записях часто отсутствует «нулевая линия», соответствующая равновесному положению элемента конструкции вагона. При этом огибающие графиков колебаний представляют собой монотонно

убывающие функции со случайными выбросами. Значения A_n в выражении логарифмического декремента затухания колебаний определялись после построения внешних огибающих и определения «нулевых линий» на графиках колебаний. Результаты обработки виброграмм показали, что величина логарифмического декремента затухания δ_s для рассматриваемых точек находится в пределах 0,105—0,205, что соответствует величине внутреннего трения $Q^{-1} = \delta/\pi = 0,034—0,083$.

Варьируя коэффициентом α в выражении матрицы демпфирования (2) в пределах $\alpha = (0,1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$ (при $\beta = 0,0$), были получены значения логарифмических декрементов затухания δ_t на математической модели (1). Для исследуемых зон (см. рис. 3) определялся уровень ошибки идентификации. В результате выполнения этой процедуры установлено, что наибольшая сходимость теоретических δ_t и экспериментальных δ_s значений наблюдается при $\alpha = 0,0003$. В табл. 1 приведены результаты сопоставления экспериментально полученных декрементов затухания колебаний с теоретическими.

Таблица 1 — Значения параметров, характеризующих затухающие колебания

№ точки	Экспериментальные значения		Численные значения	
	δ_s	Q^{-1}	δ_t	Q^{-1}
1	0,105	0,034	0,184	0,057
2	0,135	0,043	0,151	0,048
3	0,161	0,083	0,156	0,05
4	0,135	0,043	0,173	0,055
5	0,154	0,049	0,146	0,046
6	0,255	0,081	0,244	0,077

Проверка идентифицированной модели (1) с параметрами матрицы демпфирования (2), равными $\alpha = 0,0003$ и $\beta = 0,0$, осуществлялась верификацией — сопоставлением расчетных напряжений (рис. 4а) с напряжениями, полученными в результате эксперимента (рис. 4б) при установившемся режиме вибронагружения с амплитудой 88 кН.

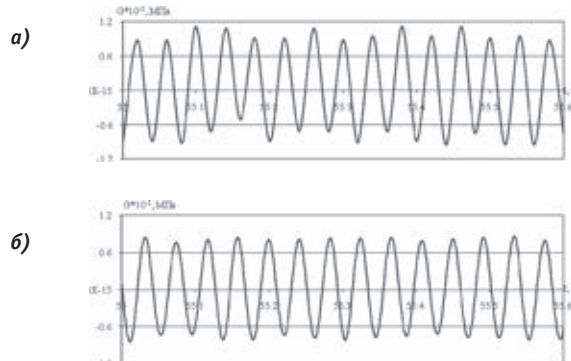


Рисунок 4 — Осциллограммы колебаний в установившемся режиме в точке 2 при нагружении вынуждающей силой вибромашины ($P = 88$ кН): а — экспериментальная запись; б — численное решение

В табл. 2 приведены результаты вычисления погрешностей численных решений в несущих элементах кузова полувагона и обшивке по схеме рис. 3.

Таблица 2 — Погрешность численных решений в элементах кузова

№ точки	Амплитуда напряжений, МПа		Погрешность вычисления, %
	σ_y	σ_z	
1	22,11	20,19	8,7
2	11,19	9,4	16
3	8,47	7,26	14,3
4	15,35	13,58	11,5
5	25,5	23,23	8,9
6	19,2	17,38	9,5

Расчеты численных экспериментов показывают, что величина погрешности по амплитуде напряжений в элементах конструкции полувагона не превышает 16%. Увеличение по-

грешности в зонах обшивки кузова обусловлено малыми значениями напряжений.

Таким образом, в работе сформулирована, реализована и проверена методика идентификации параметров математической модели вибронгруженности кузова полувагона. Методика предназначена для повышения точности результатов моделирования с использованием показателей затухания колебаний в элементах конструкции вагона. Выполнена проверка методики на примере нагружения вынуждающей силой вибромашины кузова полувагона модели 12-132, которая подтвердила высокую точность расчетных значений напряжений. Данная методика может быть рекомендована для использования в процедурах проектирования вагонов, а также для разработки требований по обеспечению их сохранности при производстве разгрузочных работ.

Литература

1. Лапшин В.Ф., Колясов К.М., Свердлов В.Б., Сендеров Г.К., Глухих А.Н., Тюленев О.В., Феодоров А.Н. Оценка сопротивления усталости элементов кузова полувагона при воздействии накладных вибромашин // Транспорт Урала. 2008. № 4. С. 53—58.
2. Долгих К.О., Колясов К.М., Лапшин В.Ф. Прогнозирование вибронгруженности кузовов полувагонов на основе математического моделирования // Проблемы и перспективы развития вагоностроения : матер. V Всерос. науч.-практ. конф. / Под. ред. В.В. Кобищанова. Брянск : БГТУ, 2010. С. 60—62. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elibrary.ru>.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М. : Наука, 1991. 431 с.
4. Маркеев А.П. Теоретическая механика : учеб. пособие для университетов. М. : Наука, 1990. 416 с.
5. Михеев Г.В. Некоторые моменты технологии построения и примеры практического применения гибридных математических моделей для исследования динамики железнодорожных транспортных средств // Безопасность движения поездов : труды науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2003. С. IV62.
6. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лашенников Б.Я., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений : учебник для вузов / под ред. А.Ф. Смирнова. М. : Стройиздат, 1984. 416 с.

References

1. Otsenka soprotivleniya ustalosti elementov kuzova poluvagona pri vozdeystvii nakladnykh vibromashin [Estimation of fatigue resistance of an open car body elements under influence of vibromachines] / V.F. Lapshin, K.M. Kolyasov, V.B. Sverdlov, G.K. Senderov, A.N. Glukhikh, O.V. Tyulenev, A.N. Feodorov. // Transport Urala. 2008. №4. S. 53 –58.
2. Dolgikh K.O., Kolyasov K.M., Lapshin V.F. Prognozirovanie vibronagruzhenosti kuzovov poluvagonov na osnove matematicheskogo modelirovaniya [Forecasting of vibroloading of open car's body on the basis of mathematical simulation] // Problemy i perspektivy razvitiya vagonostroeniya: Materialy V Vserossiyskoj nauch.-prakt. konf. (13-14 maja 2010 g., g. Bryansk) [Tekst]+[Elektronnyy resurs]/pod. red. V.V. Kobishchanova. Bryansk: BGTU, 2010. S. 60 – 62. Rezhim dostupa: <http://www.elibrary.ru>.
3. Lyung L. Identifikatsiya sistem. Teoriya dlja polzovatelja [Systems' identification. Theory for users] M.: Nauka, 1991. 431 s.
4. Markeev A.P. Teoreticheskaja mekhanika: Ucheb. posobie dlja univer-sitetov [Theoretical mechanics: Tutorial for Universities]. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1990. 416 s.
5. Mikheev G.V. Nekotorye momenty tekhnologii postroeniya i primery prakticheskogo primeneniya gibridnykh matematicheskikh modelej dlja issledovaniya dinamiki zheleznodorozhnykh transportnykh sredstv [Some aspects of construction technologies and examples of application of hybrid mathematical models for research of railway transport facilities dynamics] // Bezopasnost dvizheniya poezdov: Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii. M.: MIIT, 2003. S. IV62.
6. Stroitel'naja mekhanika [Structural mechanics]. Dinamika i ustojchivost sooruzhenij: Uchebnik dlja vuzov. A.F. Smirnov, A.V. Aleksandrov, B.Ya. Lashchennikov, N.N. Shaposhnikov; Pod red. A.F. Smirnova. M.: Strojizdat, 1984. 416 s.

УДК 629.4.027.117.2

Александр Анатольевич Миронов, доктор технических наук, главный специалист ООО «Инфотэкс АТ»
Александр Эдуардович Павлюков, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Дмитрий Николаевич Салтыков, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОВОГО БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ БУКС В ПОЕЗДАХ

Alexander A. Mironov, DSc, main specialist of LLC "Infoteks AT"
Alexander E. Pavlyukov, DSc, prof. of "Railway cars" Department, The Ural State University of Railway Transport
Dmitry N. Saltykov, PhD, assistant of "Railway cars" Department, The Ural State University of Railway Transport

Application Of Mathematical Simulation For Decision Of Practical Tasks Of Thermal Noncontact Control Of Boxes In Trains

Аннотация

Контроль за состоянием подшипниковых узлов вагонов производится в пути следования с помощью напольных средств бесконтактного теплового контроля по инфракрасному излучению букс. С использованием математического и компьютерного моделирования авторами разработана модель всего процесса контроля. Приведено описание общей структуры модели и примеры использования последней для решения практических задач теплового контроля.

Ключевые слова: буксовый узел, тепловой бесконтактный контроль, инфракрасное излучение, диагностическая модель, температура, теплопроводность, теплоотдача.

Annotation

Control of bearing boxes state is made during travel with the help of floor devices of noncontact thermal control by infrared radiation of boxes. With the help of mathematical and computer a model of control process is developed. The description of generic structure of a model and examples of model's use for decision of practical tasks of thermal noncontact control is made.

Key words: box junction, thermal noncontact control, infrared radiation, diagnosis model, temperature, heat conductivity, heat emission.

Значительная часть неисправностей вагонов в пути следования связана с повышением нагрева подшипников, что может привести к их разрушению и дальнейшему «горячему» излому шейки оси колесной пары.

Контроль за состоянием буксовых узлов вагонов производится визуально на пунктах технического обслуживания (ПТО) осмотрщиками, а на перегонах и подходах к пунктам технического обслуживания — напольными бесконтактными системами теплового контроля (СТК) по инфракрасному (ИК) излучению от букс проходящих поездов. Напольные СТК являются распределенными по участкам безостановочного движения поездов системами, расположенными на расстоянии один от другого 20—50 км. Практически задача теплового контроля сводится к тому, чтобы по нагреву доступных для контроля внешних поверхностей корпусов букс оценивать температурное состояние подшипников и шейки оси колесной пары. В настоящий момент на дорогах России и некоторых стран СНГ эксплуатируются напольные системы КТСМ-01 (с ориентацией приемника инфракрасного излучения на крышку буксы) и КТСМ-02 (с ориентацией приемника ИК-излучения на нижнюю часть корпуса буксы).

При эксплуатации средств теплового контроля букс подвижного состава приходится решать множество задач, связанных с необходимостью повышения качества работы существующих и внедряемых приборов, оценкой контролепригодности букс различного типа подвижного состава и апробированием алгоритмов оценки работоспособности подшипников и буксовых узлов в целом по тепловым сигналам.

Перечисленные задачи решаются различными методами: экспериментальными, опытной эксплуатацией и при помощи математических моделей. В общем случае для создания и эффективного функционирования автоматизированных систем бесконтактного теплового контроля диагностирования необходимо решить задачи разработки диагностического обеспечения объекта.

Математическая формулировка диагностической модели бесконтактного теплового контроля в общем виде записывается следующим образом:

$$z(t) = A(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где $z(t)$ — тепловой сигнал на приемнике ИК-излучения, выраженный зависимостью принятой мощности излучения от буксы в зоне сканирования приемником, либо зависимостью температуры в зоне сканирования буксы, либо зависимостью в условных единицах средства теплового контроля;

t — время;

A — оператор преобразования (перевода) системы из состояния в состояние;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ — параметры системы: скорость движения вагона, загрузка вагона, характеристики и геометрические неровности пути; физические и геометрические характеристики вагона, температура окружающей среды, коэффициенты трения на поверхностях подшипников, характеристики пропуска средой излучения, оптические характеристики принимающей системы и т. д.

Диагностическая модель может иметь детерминированный характер, т. е. рассчитывать жесткое соответствие между входными и выходными величинами или учитывать вероятностный характер этой связи, обусловленный значительной случайной составляющей процесса диагностирования. В первом случае оператор перевода A является детерминированным и выражается, например, матрицей постоянных коэффициентов, во втором случае оператор перевода является матрицей случайных чисел.

Рассмотрим *детерминированную диагностическую модель* бесконтактного теплового контроля буксовых узлов, которую для удобства представим в виде следующих блоков — моделей (рис. 1).

1. Модель движения единицы подвижного состава для оценки перемещений и силового режима работы буксового узла.
2. Термомеханическая модель функционирования буксового узла.
3. Модель сканирования буксы подвижной единицы приемником ИК излучения при проследовании поезда.
4. Моделирование ИК-излучения с зоны сканирования, передачи энергии на приемник ИК-излучения и определения нагрева буксы.



Рисунок 1 — Схема виртуальной диагностической модели бесконтактного теплового контроля

Остановимся на общем описании работы комплекса моделей и взаимодействия блоков.

В первом блоке в соответствии с рис. 1 решается задача компьютерного моделирования движения вагона по заданным неровностям (гармоническим, случайным или полученными по данным вагона-путеизмерителя с конкретного участка пути и т. д.) [1, 2].

Выходные данные моделирования движения — зависимости (осциллограммы) вертикальных и осевых сил, действующих на буксовый узел, по которым определяются математические ожидания (для случайных неровностей) указанных параметров. Значения математических ожиданий сил являются входными данными для определения во втором блоке нагруженности роликов подшипников буксового узла и процесса образования тепла при работе подшипников. Также рассчитанные на модели зависимости перемещений буксового узла от времени служат входными данными для третьего блока.

Во втором блоке реализуется термомеханическая модель, разработанная на принципе приведения задачи конвективно-теплообмена к рассмотрению процесса теплопроводности в буксовом узле [3]. Решение задачи выполняется методом конечного элемента.

Для определения граничных условий решается задача определения теплообразования в работающем подшипнике от нагрузок, полученных на модели блока 1. Рассчитанные при решении данной задачи тепловые потоки служат входными данными (граничными условиями второго рода) для определения полей температур с помощью модели теплопроводности.

Также граничными условиями (третьего рода) для расчета теплопроводности являются поля коэффициентов теплоотдачи с поверхности, полученные при моделировании обтекания буксового узла и элементов тележки встречным потоком воздуха, возникающим при движении. Тем самым учитывается изменение температуры буксы, вызванное не только температурой окружающего воздуха, но и обдувом при движении вагона.

Выходными данными модели блока 2 служат поля температур внутри и на поверхности буксового узла, построенные по значениям температур в каждом конечном элементе согласно топологии сетки элементов.

В третьем блоке моделируется процесс проследования буксового узла через зону контроля приемника ИК-излучения. При этом решается геометрическая пространственная задача динамического пересечения поверхности буксового узла с зоной контроля приемника, выраженной в пространстве сферическим конусом с углом, вершина которого находится в точке, из которой исходит оптическая ось приемника [4]. Итогом решения данной задачи является математическое описание траектории сканирования приемником поверхности буксы. В результате на базе исходного массива конечных элементов (КЭ) с поверхности контролируемого буксового узла единицы подвижного состава в процессе «отсева» КЭ по признаку «попадания» в зону контроля приемника ИК-излучения формируется новый массив конечных элементов, тепловое излучение которых воспринимается приемником. Таким образом, в четвертый блок передается геометрическая и физическая информация (значения температур) о КЭ в зоне контроля приемника в каждый момент времени.

В четвертом блоке производится расчет параметров инфракрасного излучения с полученного в блоке 3 массива ко-

нечных элементов, находящихся в зоне контроля приемника в каждый момент времени [4]. При этом учитываются факторы, влияющие на прием излучения: свойства внешней среды и геометрические параметры системы. Вычисляется мощность излучения, принимаемая приемником ИК-излучения в каждый момент времени контроля, по существу — осциллограмма теплового сигнала, пропорционального принимаемой мощности.

По полученной осциллограмме оценивается нагрев буксы. Если нагрев буксы оценивается в относительных единицах — условных уровнях (квантах) теплового сигнала, то приведенное принятой от буксы и рассчитанной мощности излучения (осциллограммы) в соответствующие значения условных уровней нагрева выполняется в приемном устройстве (ПУ) системы с использованием калибровочного коэффициента. Значение данного коэффициента находится для определенной температуры воздуха (в интервале рабочих температур) в процессе периодически проводимых калибровок СТК с использованием эталонного излучателя известной температуры.

Моделирование оценки нагрева буксы в абсолютных и относительных температурах производится или по интегральной температуре в КЗ в зоне сканирования, или через принимаемую мощность излучения.

Первые два блока рассмотренной структуры диагностической модели относятся к функционированию объекта теплового контроля и могут быть названы нами для удобства условно «виртуальная букса», третий и четвертый блоки относятся к моделированию работы средства теплового контроля и могут быть названы условно «виртуальный прибор».

«Виртуальная букса» и «виртуальный прибор» для каждого конкретного случая (типа подвижного состава, типа СТК) образуют виртуальную диагностическую модель теплового контроля. Согласно разработанным и приведенным выше математическим моделям 3-го и 4-го блоков разработано специальное программное обеспечение «Виртуальный прибор». Оно осуществляет считывание тепловых полей, полученных на термомеханической модели из программного комплекса метода конечных элементов, обработку траектории сканирования, определение осциллограммы сигнала.

Оценка достоверности разработанной диагностической модели первоначально производилась по блокам «виртуальная букса» сопоставлением температур, рассчитанных на моделях, с температурами, полученными при стендовых испытаниях [5]. Достоверность блоков «виртуальный прибор» оценивалась по результатам испытаний на экспериментальном кольце ВНИИЖТ. Верификация сводилась к сопоставлению результатов определения уровней нагрева расчетным путем на моделях и по показаниям КТСМ-02 в отдельные моменты времени испытаний [5], когда букса находилась в стационарном режиме нагрева и когда поезд следовал мимо установки КТСМ-02.

Покажем использование разработанных моделей для решения текущих оперативных задач теплового контроля и перспективных задач по созданию нового оборудования для теплового контроля, а также решения проблем модернизации подвижного состава на основе информации, полученной при тепловом контроле.

Тепловому контролю подвергаются поезда, следующие с различными скоростями. Возникает вопрос: каким образом скачивается скорость на нагреве подшипников и корпусов букс и

нет ли необходимости при оценке нагрева букс учитывать скорость движения вагона, т. е. применять дифференцированные пороговые значения контроля? Актуальность этого вопроса возрастает по мере того, как все большее распространение получает высокоскоростное движение пассажирских поездов, а кроме того, имеется перспектива перевозки отдельных грузов (контейнеров) с повышенными скоростями движения. На первый взгляд логично было бы предположить, сравнивая значения скоростей, реализуемые в эксплуатации пассажирского подвижного состава (100 и 200 км/ч): если различие значений двукратное, почему нагрев букс не может различаться тоже в два раза?

Рассмотрим на термомеханической модели, как влияет скорость движения вагона на нагрев буксы. Так как нет принципиальной разницы в работе и моделировании подшипников в буксах грузового и пассажирского вагонов, то используем для расчетов буксу колесной пары грузового вагона с цилиндрическими подшипниками в тележке грузового вагона. Зададимся изменением скоростей движения в интервале от 20 до 200 км/ч при температурах наружного воздуха -20°C , 0°C , $+20^{\circ}\text{C}$ и будем оценивать тепловое излучение зоны контроля КТСМ-02, а именно нижнюю часть корпуса, а также температуру подшипников внутри буксы.

Результаты моделирования (рис. 2) показывают, что температура корпуса буксы меняется в основном в интервале скоростей от 20 до 80 км/ч. Температура корпуса при этом изменяется на 25—30%. В то же время в интервале от 100 до 200 км/ч изменение температуры корпуса буксы не превышает 10% в заданном диапазоне температуры воздуха. Это связано с тем, что с повышением скорости нелинейно растет и тепловыделение в подшипнике, а также теплоотдача с поверхности буксы.

Избыточная температура (относительно температуры воздуха) корпуса буксы (табл. 1) зависит от температуры наружного воздуха, что подтверждается расчетами и данными эксплуатации. Так, при температуре воздуха -20°C избыточная температура подшипника и корпуса буксы выше соответствующих значений на данной скорости при температуре воздуха 20°C . Следует отметить, что температура подшипника меняется более существенно от скорости (см. рис. 2 и табл. 1), чем температура поверхности корпуса буксы. В интервале от 20 до 80 км/ч температура подшипника максимально меняется на 40%, а в интервале от 100 до 200 км/ч — на 22%.

Практически стабильный, независимый от роста скорости движения поезда нагрев внешней поверхности корпуса буксы происходит на фоне отличающегося по природе изменения температуры подшипника (см. табл. 1). Используем для иллюстрации коэффициент передачи избыточной температуры (относительно температуры воздуха), который определяется отношением избыточной температуры на корпусе буксы в конкретном месте к избыточной температуре на подшипнике,

$$K_{\text{пер}}^{\text{избыт}} = \frac{t_{\text{буксы}}^{\text{избыт}}}{t_{\text{подшипн.}}^{\text{избыт}}}.$$

Очевидно, что чем больше значение данного коэффициента для зоны корпуса буксового узла, тем больше данная зона отражает температуру подшипника. Определим изменение значения коэффициента передачи избыточной температуры подшипника на корпус буксы (нижнюю часть) с ростом скорости вагона. На скорости 100 км/ч и при температуре наружного воздуха -20°C

Таблица 1 — Зависимости изменений избыточных температур элементов буксового узла от скорости движения вагона

Элемент конструкции	Температура воздуха, °С	Значения избыточных температур (°С) при скорости (км/ч)									
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Корпус буксы низ	-20,0	13,8	16,5	17,5	18,0	18,2	18,3	18,3	18,2	18,2	18,2
	0,0	7,9	10,2	11,5	12,2	12,8	13,2	13,5	13,8	14,0	14,2
	20,0	5,7	7,8	8,9	9,7	10,2	10,6	10,9	11,2	11,4	11,6
Подшипник	-20,0	16,2	20,2	22,2	23,6	24,6	25,5	26,2	27,0	27,8	28,5
	0,0	9,3	12,5	14,7	16,2	17,4	18,6	19,6	20,6	21,5	22,4
	20,0	6,8	9,6	11,4	12,8	13,9	15,0	15,9	16,8	17,6	18,4
Коэффициент передачи избыточной температуры подшипника на низ корпуса буксы		0,85	0,82	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,67	0,66	0,64

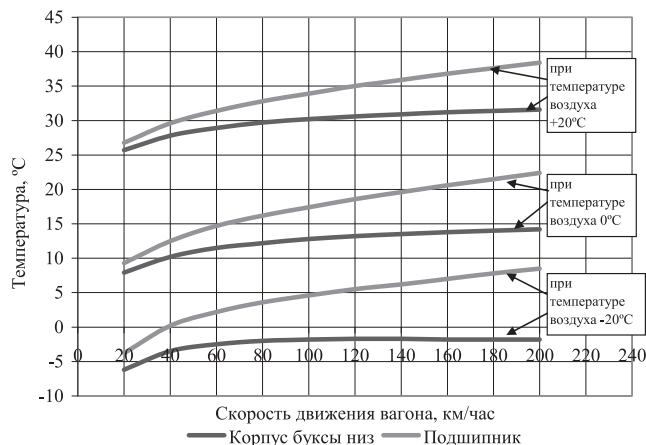


Рисунок 2 — Зависимости изменений температур элементов буксового узла от скорости движения вагона

избыточные температуры (см. табл. 1) нижней части корпуса буксы 18,2°С, подшипника 24,6°С. При этом коэффициент передачи избыточной температуры подшипника на корпус буксы составляет $18,2^{\circ}\text{C} / 24,6^{\circ}\text{C} = 0,74$. На скорости 200 км/ч и при температуре наружного воздуха -20°С избыточные температуры нижней части корпуса буксы 18,2°С, подшипника 28,5°С. При этом коэффициент передачи избыточной температуры составляет $18,2^{\circ}\text{C} / 28,5^{\circ}\text{C} = 0,64$. Таким образом, при равных температурах на корпусе буксы на скорости 100 и 200 км/ч и соответственно одинаковых показаниях аппаратуры теплового контроля (у которой приемник ИК-излучения ориентирован на эту зону корпуса), имеем «недооценку» температуры подшипника на скорости 200 км/ч всего на 17% в сравнении с подшипником на скорости 100 км/ч. Характер и величина данных различий позволяют сделать вывод о нецелесообразности введения переменных пороговых значений при тепловом контроле вагонов пассажирских поездов и электропоездов, обращающихся на одном и том же участке с различными скоростями движения.

Повышение информативности сканирования буксы приемником излучения. В отдельных зарубежных системах теплового контроля, например, VAE-HOA 400 DS, Phoenix MB, FÜS II, приемник ИК-излучения за счет перемещений оптики вдоль оси колесной пары во время ее проследования через зону контроля производит сложное сканирование нижней части поверхности буксы. Несколько организаций в России под руководством ОАО «НИИАС» ведут работы над созданием высокоскоростного приемника ИК-излучения для такой технологии сканирования, предполагая повышение информативности сигнала с буксы. Поэтому представляет практический интерес

оценить виртуальным путем на разработанных моделях то, какие данные можно получить, применяя развернутое сканирование нижней части корпуса буксы.

На взгляд авторов, для диагностики буксового узла по тепловым признакам целесообразно распознавание местоположения неисправного подшипника в буксе при ее повышенном нагреве. В связи с этим будем проводить исследование развернутого сигнала:

- на равномерно нагретой буксе;
- буксе с неисправным заклиненным передним подшипником;
- буксе с неисправным заклиненным задним подшипником.

Для решения поставленной задачи с помощью разработанных моделей и программного обеспечения «Виртуальный прибор» имитировалось развернутое сканирование, как показано на рис. 3. Схема исследуемых сечений 1—9, по которым производится сканирование буксы, показана на рис. 3а, а на рис. 3б — окно программы «Виртуальный прибор» с расчетной траекторией «пятна» (проекции на буксу зоны контроля приемника, выраженной в пространстве конусом, — см. блок 3 модели на рис. 1) снизу на буксе и боковой раме.

В соответствии со структурой диагностической модели, (см. рис. 1) сначала на термомеханической модели выполнялась оценка температурных полей буксовых узлов, находящихся в вышеуказанных состояниях. Визуальный анализ полученных температурных полей показывает, что заклинивание переднего или заднего подшипников, как и предполагалось, влияет соответствующим образом на характер температурного поля.

В качестве оценочного числового показателя при моделировании разных состояний букс использовалось изменение во времени средней температуры «пятна», а именно осциллограмма сигнала, пропорционального считанной температуре. Непрерывная осциллограмма сигнала разбивалась на дискретные значения по сечениям 1—9 (см. рис. 3а), и на основе полученных значений строились графики температур на нижней поверхности корпуса буксы по сечениям 1—9. На рис. 4 приведены графики для исследуемых состояний буксы по трем основным сечениям: на краях траектории сканирования (это сечения 1 и 9) и среднее сечение 5.

Анализ полей температур и графиков температур в сечениях показывает, что идентификация неисправного подшипника возможна при развернутом сканировании нижней части корпуса буксы. При этом неисправность переднего подшипника выражена превышением температур в сечении 9 (соответствует положению переднего подшипника) над температурами в остальных сечениях более отчетливо, чем в зеркальной ситуации заклинивания заднего подшипника (сечение 1, рис. 4в). Это связано с тем, что на характере нагрева корпуса буксы при заклинивании

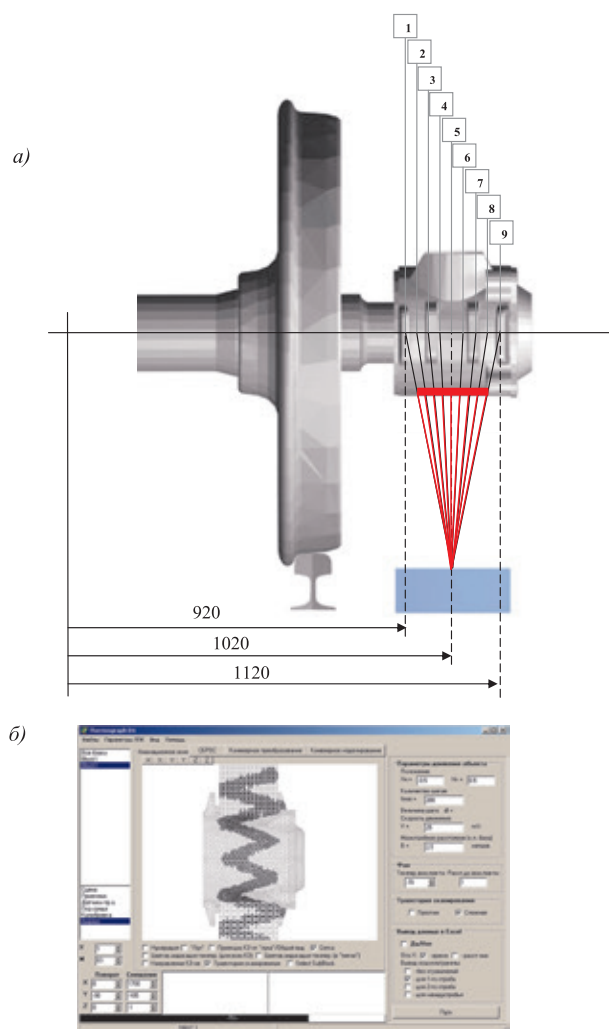


Рисунок 3 — Геометрия (а) и расчетная траектория (б – вид снизу) развернутого сканирования буксы приемником ИК-излучения

заднего подшипника более существенно сказывается влияние колеса, на которое происходит естественная теплоотдача.

Выполненные расчеты оценки возможности распознавания в процессе диагностики местоположения неисправного подшипника при развернутом сканировании показывают, как диагностическая модель может быть использована для проектирования СТК нового поколения.

Исследования по тепловому контролю на диагностических моделях неразрывно связаны с совершенствованием конструкции буксового узла в контексте контролепригодности. Покажем, как с использованием термомеханической модели можно выполнить оценку конструкции буксового узла кассетного типа с адаптером с точки зрения теплового состояния подшипников.

Среди конструкций буксового узла, включающих кассетный подшипник и адаптер, имеются варианты применения упругих элементов из эластичных материалов — резины, полиуретана и др. Упругие элементы выполняют частично роль надбуксового подвешивания тележки и могут устанавливаться между адаптером и буксой, между подшипником и адаптером.

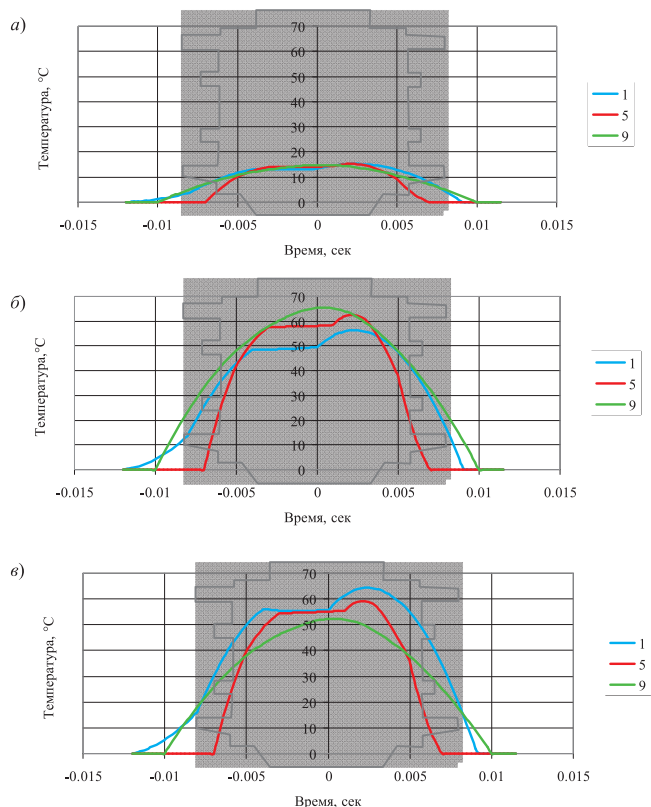


Рисунок 4 — Графики температур (сигналов) с нижней поверхности буксы в сечениях 1, 5, 9 при развернутом сканировании: а — букса с исправными подшипниками; б — с заклиненным передним подшипником; в — с заклиненным задним подшипником

Поскольку полимерные материалы обладают низкой теплопроводностью, то очевидно их влияние на тепловое состояние подшипника и соответственно тепловой контроль.

Для изучения данного влияния проведены сравнительные расчеты следующих вариантов конструкции:

- кассетный конический подшипник с адаптером;
- кассетный конический подшипник с адаптером и упругим полимерным элементом между адаптером и рамой тележки (толщина полимерного элемента 10 мм);
- кассетный конический подшипник с адаптером и полимерным упругим элементом между подшипником и адаптером (толщина полимерного элемента 10 мм).

Расчет производился при одних и тех же граничных и начальных условиях: скорость движения 60 км/ч, температура воздуха 0°C. Конструкция адаптера, толщина и форма упругих прокладок условные. Кроме того, в модели есть упрощения: тарельчатая торцевая шайба крепления подшипника выполнена не как отдельная деталь, а как продолжение оси, аналогично смоделированы уплотнения в кассете.

Выполненные расчеты, результаты которых приведены в виде температурных полей (рис. 5), показывают, что в первом варианте конструкции (без упругого элемента) температура подшипника принимает наименьшее значение (см. рис. 5а), например, в зоне контроля КТСМ-01(торцевая шайба) температура составляет 41°C, в зоне контроля КТСМ-02 (низ корпу-

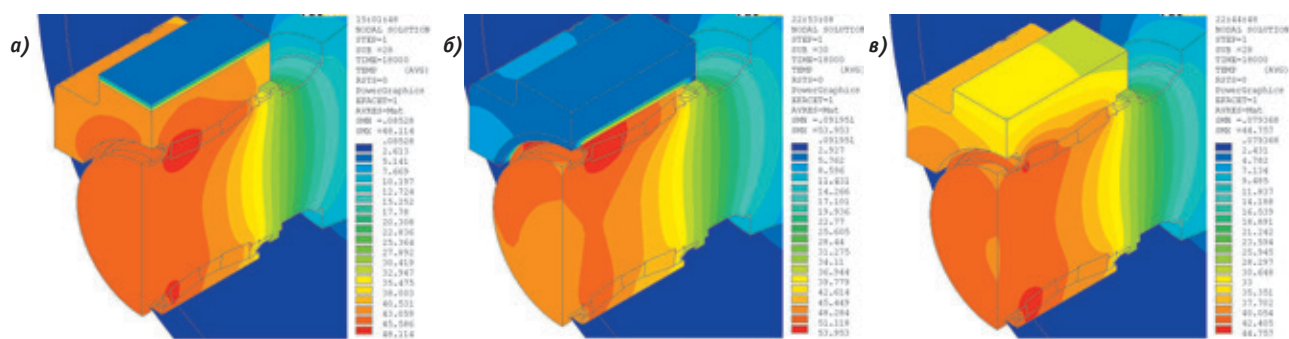


Рисунок 5 — Температурные поля в кассетном подшипнике и опоре: а — адаптер на подшипник; б — адаптер на подшипник с упругим элементом сверху; в — адаптер на подшипник через упругий элемент

са кассеты) — 39°C. При установке упругого элемента между подшипником и адаптером (3-й вариант) теплопроводность в направлении адаптера уменьшается, поэтому температура подшипника выше, чем без упругого элемента, так, в зоне контроля КТСМ-01 температура составляет 51°C, в зоне контроля КТСМ-02 — 46°C (см. рис. 5в). Следовательно, в этом случае подшипник работает в условиях более высокого нагрева. Кроме того, упругий полимерный элемент испытывает максимальные тепловые нагрузки, что может нарушить его работоспособность, так как допускаемые температуры условий работы полимерных элементов относительно невысоки.

Если исходить из необходимости наличия в данном узле упругого элемента для улучшения динамических качеств тележки, то целесообразно применить второй вариант из рассмотренных конструкций, когда упругий элемент расположен

между адаптером и рамой тележки (см. рис. 5б). В этом случае нагрев подшипника занимает промежуточное положение между первым и третьим вариантом, так как тепло от подшипника отводится на адаптер.

Помимо рассмотренных задач с использованием диагностической модели решаются следующие проблемы теплового контроля: исследование вопросов контролепригодности ходовых частей разнородного подвижного состава к тепловой диагностике; оценка влияния нагрева колеса при торможении на нагрев буксы и влияния этих процессов на показания при тепловом контроле; изучение воздействия различных неисправностей подшипников и буксового узла на динамику нагрева буксы; исследования по выбору рациональных значений критериев оценки нагрева буксовых узлов при мониторинге их теплового состояния.

Литература

1. Павлюков А.Э., Миронов А.А., Занкович А.В. Диагностическая модель бесконтактного теплового контроля букс подвижного состава // Транспорт Урала. 2004. № 2. С. 44—52.
2. Миронов А.А., Занкович А.В., Павлюков А.Э. Исследование термонагруженности буксового узла с кассетным подшипником // Транспорт Урала. 2005. № 6. С. 54—61.
3. Миронов А.А., Павлюков А.Э., Образцов В.Л., Занкович А.В. Моделирование температурных полей буксового узла с цилиндрическими и коническими роликовыми подшипниками // Вестник ВНИИЖТ. 2007. № 2. С. 37—40.
4. Миронов А.А. Имитационная модель функционирования аппаратуры теплового контроля буксовых узлов подвижного состава // Транспорт, наука, техника, управление. 2009. № 5. С. 8—14.
5. Миронов А.А. Научные и технические основы бесконтактного теплового контроля букс железнодорожного подвижного состава : дис. ... д-ра техн. наук / УрГУПС. Екатеринбург, 2009.

References

1. Pavlyukov A.E., Mironov A.A., Zankovich A.V. Diagnosticheskaja model beskontaktnogo teplovogo kontrolja buks podvizhnogo sostava [Diagnosis model of noncontact heat control of rolling stock boxes] // Transport Urala. 2004. № 2. S. 44—52.
2. Mironov A.A., Zankovich A.V., Pavlyukov A.E. Issledovanie termonagruzhennosti buksovogo uzla s kassetnym podshipnikom [Research of thermoloading of box junction with bearing units] // Transport Urala. 2005. № 6. S. 54—61.
3. Mironov A.A., Pavlyukov A.E., Obratsov V.L., Zankovich A.V. Modelirovanie temperaturnykh polej buksovogo uzla s tsilindricheskimi i konicheskimi rolkovymi podshipnikami [Simulation of thermal fields of box junction with cylindrical and conic roller bearings] // Vestnik VNIIZhT. 2007. № 2. S. 37—40.
4. Mironov A.A. Imitatsionnaja model funkcionirovanija apparatury teplovogo kontrolja buksovykh uzlov podvizhnogo sostava [Imitation model of the equipment work of thermal control of box junctions of rolling stock] // Transport, nauka, tekhnika, upravlenie. 2009. №5. S. 8—14.
5. Mironov A.A. Nauchnye i tekhnicheskie osnovy beskontaktnogo teplovogo kontrolja buks zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Scientific and technical fundamentals of non-contact thermal control of railway rolling stock boxes]: Diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.07 / Uralskij gos. un-t putej soobshchenija. Ekaterinburg, 2009.

УДК 656.346

Николай Сергеевич Бачурин, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Александр Александрович Красниченко, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Данил Юрьевич Шавырин, аспирант, ассистент кафедры Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА

Nikolai S. Bachurin, DSc, professor of 'Railway cars' chair of the Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg
Aleksander A. Krasnichenko, PhD, senior lecturer of 'Railway cars' chair of the Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg
Danil Yu. Shavyrin, post-graduate student, assistant at 'Railway cars' chair of the Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg

Theoretical And Experimental Research Of Tram Car Dynamics

Аннотация

В современной городской транспортной системе России из года в год все более важное место занимают трамвайные вагоны, так как этот вид транспорта обеспечивает минимальные эксплуатационные затраты и высокие объемы перевозки пассажиров. В связи с этим необходимо повышение скоростей движения трамваев, улучшение комфортности перевозки пассажиров, а также создание новых современных трамвайных вагонов.

Цель настоящей работы состоит в разработке методики оценки динамической нагруженности трамвайного вагона.

Для решения задачи разработана математическая модель движения трамвайного вагона, которая включает в себя описание кинематических и моделирование силовых связей. Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить адекватность разработанной математической модели движения трамвайного вагона.

Предлагаемая методика может быть использована для прогнозирования динамической нагруженности трамвайного вагона как на стадии проектирования новых трамвайных вагонов, так и при модернизации уже существующих.

Ключевые слова: динамическая нагруженность, математическая модель, кинематическая схема трамвайного вагона, экспериментальные исследования, геодезическая съемка.

Annotation

In modern urban transport system of Russia tram cars take very important place as such means of transport provide minimum operating costs and high flows of passenger traffic. Therefore it is necessary to increase trams speed, improve the comfort conditions of passenger transportation and develop new modern tram cars.

The objective of present work is to develop the evaluation method of tram car dynamic stress loading.

To solve this problem it is developed the mathematical model of tram car movement, which includes the description of kinematic relations and modeling of power ones. The conducted field research allowed to estimate the validity of tram car mathematical model.

The developed method can be used for diagnosing tram car dynamic loading both on the stage of new tram cars' design and the existing tram cars' modernization.

Key words: dynamic loading, mathematical model, tram car kinematic scheme, field research, geodetic survey.

Среди комплекса научно-технических проблем, направленных на улучшение перевозочного процесса, важным является снижение динамической нагруженности трамвайных вагонов в эксплуатации.

С целью прогнозирования динамической нагруженности была разработана математическая модель движения трамвайного вагона. Он был представлен в виде структурного графа, отражающего кинематические и силовые связи тел, входящих в систему. Структура графа строилась из условия построения корректной расчетной схемы и математической модели, а также возможности учета в модели различных конструктивных вариантов узлов и деталей. С учетом этого предложен граф, имеющий незамкнутую структуру в виде дерева (рис. 1).

Положение каждого тела представлялось шестью обобщенными координатами, соответствующими шести степеням свободы твердого тела. Эти координаты были объединены в вектор положения размерности 6×1

$$q = [r_{i,x} \quad r_{i,y} \quad r_{i,z} \quad \psi_i \quad \chi_i \quad \phi_i]^T$$

Транспортные рельсовые средства представляют собой многомерные голономные системы. В данном случае голоном-

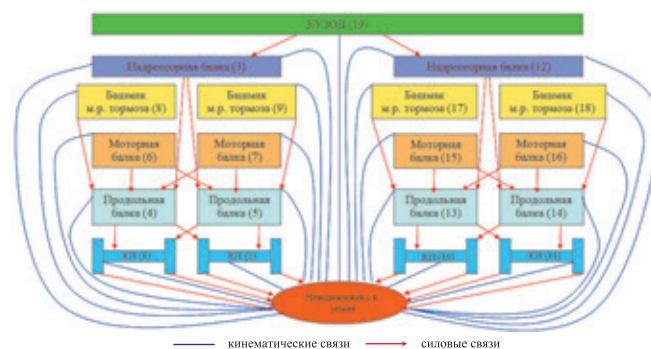


Рисунок 1 — Граф модели трамвайного вагона

ная система трамвайного вагона состояла из 19 тел (схема нумерации и обозначения тел показана на рис. 1) и 16 голономных ограничений, имела m степеней свободы: $m = 6n - k = 98$.

Положение системы было определено с помощью 98 обобщенных координат q , суммированных в вектор состояния. Положение, скорость (линейная, угловая) и ускорение системы (линейное, угловое) описывались с помощью соотношений для системы тел, представляющих вагон (рис. 2) в базовой путевой системе координат:

$$r_i = r_i(q, t); \Pi_i = \Pi_i(q, t); i = 1 \dots 19;$$

$$v_i^{(0)} = D_i^{(0)} \dot{q} + v_i'^{(0)}, \quad \omega_i^{(0)} = B_i^{(0)} \dot{q} + \omega_i'^{(0)};$$

$$a_i^{(0)} = D_i^{(0)} \ddot{q} + a_i'^{(0)}, \quad \varepsilon_i^{(0)} = B_i^{(0)} \ddot{q} + \varepsilon_i'^{(0)};$$

$v_i'^{(0)}, \omega_i'^{(0)}, a_i'^{(0)}, \varepsilon_i'^{(0)} = 0$ — при склерономных связях.

Уравнения движения Ньютона — Эйлера относительно обобщенных координат для модели вагона, не имеющей замкнутых кинематических цепей, имели вид

$$\sum_{i=1}^{19} M_i(q, t) \ddot{q} + \sum_{i=1}^{19} k_i(q, \dot{q}, t) = \sum_{i=1}^{19} Q_i, \quad (1)$$

где M — матрица масс;

k — матрица-столбец сил инерции;

Q — матрица-столбец обобщенных сил.

В результате получены уравнения движения рельсового экипажа, представляющие собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с нелинейными правыми.

Система (1) записана в общем виде. Для вывода правой части — обобщенных сил — разрабатывалась математическая модель силовых связей в вагоне, затем производился синтез общих уравнений движения с использованием аналитической программной среды «Универсальный механизм».

На рис. 2 изображена кинематическая схема трамвайного вагона. С каждым телом (i) условно жестко связывается система координат (СК) с началом в центре масс C_i . В этой системе создавался графический образ тела, который автоматически размещался программой [1] в положение, определенное координатами тела, и являлся основой графического изображения модели трамвайного вагона.

Каждое тело модели имело собственную систему координат (см. рис. 2). Базовая система координат имела номер 0. Указаны также повороты тел относительно друг друга: $\varphi_{ip}, x_{ip}, \psi_{ij}$ — поворот тела i относительно тела j вокруг соответственно осей x, z и y .

Описание шарниров является основой введения координат, определяющих положение каждого тела модели относительно инерциальной СК. Обязательным условием полного описания модели была ее связность, т. е., во-первых, каждое тело обязательно соединяется по меньшей мере одним шарниром с каким-либо другим телом (среди которых может быть и базовая СК), во-вторых, от каждого тела через цепочку шарниров можно переместиться к базовой СК. Необходимость связности диктуется необходимостью задания обобщенных координат, определяющих положение каждого тела системы в пространстве.

Взаимодействие между телами в модели тележки трамвайного вагона осуществляется с помощью сил, упругих и диссипативных связей.

Конструкция тележки трамвайных вагонов модели «Спектр» включает множество резиновых элементов: буфера,

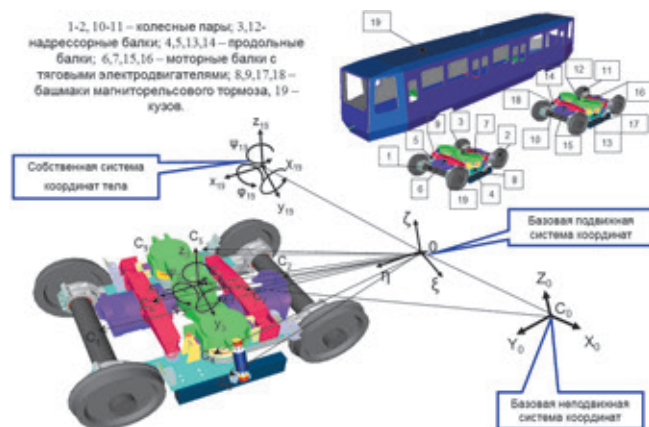


Рисунок 2 — Схема задания координат и номеров тел в модели трамвайного вагона

ограничивающие перемещения наддрессорной балки в горизонтальной плоскости, амортизаторы, устанавливаемые под пружины рессорного подвешивания и моторную балку. Они способствуют повышению плавности хода вагона и улучшению комфортности перевозки пассажиров.

В процессе разработки математической модели рельсового экипажа возникают задачи по определению упруго-диссипативных характеристик резиновых амортизаторов. С этой целью была применена методика математического моделирования свойств резины [2]. Она позволила определить и смоделировать упругие и демпфирующие характеристики резиновых элементов в зависимости от частоты вынуждающей силы. При возрастании частоты жесткость резинового элемента увеличивается. Особый интерес представляют частоты до 20 Гц. В этом частотном диапазоне также проявляются первые признаки резонансных колебаний отдельных частей кузова, вагона [2].

Использованная методика моделирования работы резиновых амортизаторов позволила с большей точностью учесть их динамические свойства. Она базировалась на использовании простых реологических моделей, составленных из отдельных элементов с характеристиками, пропорциональными скорости [3].

Внешние возмущения, действующие на трамвайный вагон в результате взаимодействия колес с рельсами, задавались как вертикальные и поперечные неровности пути, определенные с помощью геодезической съемки.

Для проведения геодезической съемки был выбран участок трамвайного пути, на котором проводились ходовые динамические испытания трамвайного вагона. Путь был разбит на отрезки, равные 2 м, и для каждой точки пути были определены координаты относительно базовой системы координат.

По результатам геодезической съемки были построены продольный план (определены уклоны) и профиль (определены параметры кривых) трамвайного пути (рис. 3).

Также были определены неровности трамвайного пути (микрогеометрия): вертикальные и поперечные неровности левого и правого рельса (рис. 4).

Современный подвижной состав, в том числе и трамвайный вагон, представляет собой сложную статически неопределимую механическую систему, на которую при движении действуют разнообразные эксплуатационные нагрузки, несущие, как

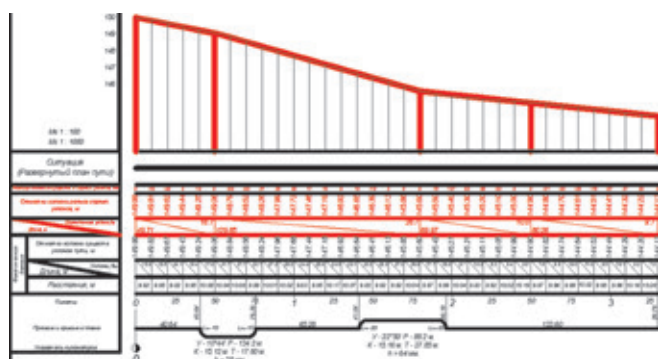


Рисунок 3 — Продольный план и профиль пути

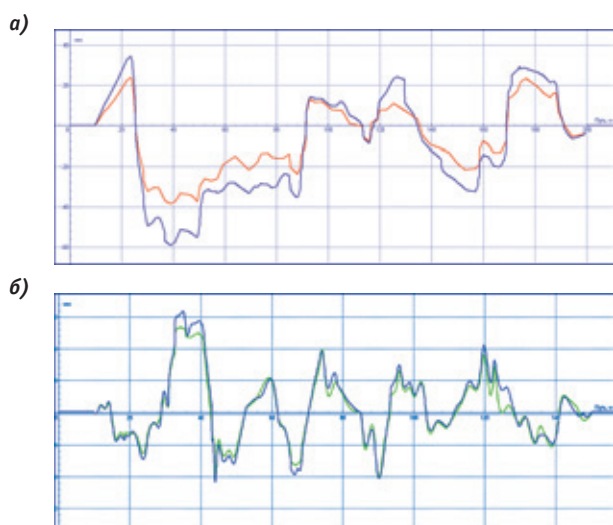


Рисунок 4 — Неровности трамвайного пути:
а — вертикальные; б — горизонтальные (поперечные)

правило, случайный статистический характер. Для создания рациональной, долговечной и надежно работающей конструкции вагона с требуемыми динамическими качествами наряду с теоретическими исследованиями проводятся эксперименты.

С целью верификации разработанной математической модели движения трамвайного вагона проводились экспериментальные исследования динамической нагруженности вагона.

В качестве объекта исследований был принят 4-осный трамвайный вагон модели 71-403 (рис. 5), производимый на ФГУП «Уралтрансмаш» в Екатеринбурге. Технические характеристики трамвайного вагона представлены в табл. 1.



Рисунок 5 — Трамвайный вагон 71-403 «Спектр»

В процессе ходовых динамических испытаний определялись следующие параметры: динамический и статический прогибы рессорного подвешивания; вертикальные и горизонтальные ускорения кузова в зоне шкворневой балки; вертикальные и горизонтальные перемещения наддрессорной балки тележки; скорость движения.

Для регистрации ускорений использовались индуктивные датчики ускорений В12/200. Три датчика были размещены на шкворневой балке рамы трамвайного вагона (регистрация ускорений кузова в трех направлениях) и один — на продольной балке тележки (регистрация вертикальных ускорений необрессоренных частей) (рис. 6).

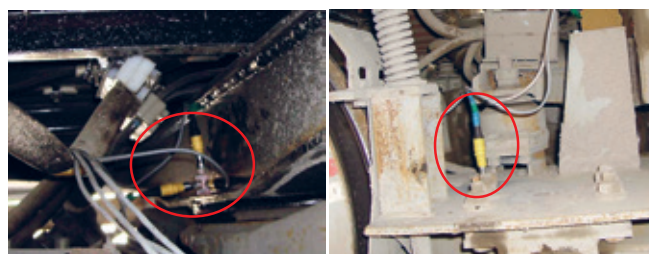


Рисунок 6 — Размещение датчиков ускорений на шкворневой и продольной балках тележки

Для регистрации перемещений наддрессорной балки были использованы тензометрические прогибомеры, размещенные на тележке трамвайного вагона (рис. 7).



Рисунок 7 — Размещение датчиков перемещений на тележке

Скорость движения трамвая фиксировалась бесконтактным индуктивным датчиком ВБИ-М18-86У-2113-3. Аппаратура фиксировала поворот колеса при прохождении металлического язычка, закрепленного на колесе, мимо датчика (рис. 8).

Таблица 1 — Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Параметр	Теоретические исследования			Экспериментальные исследования			Максимальное отклонение результатов теоретических и экспериментальных исследований, %
	Загрузка салона, т			Загрузка салона, т			
	-	5,9	11,8	-	5,9	11,8	
Ускорения кузова (max), м/с ²							
Вертикальное	3,8	1,5	0,9	3,2	1,3	1,3	15
Поперечное	2,1	1,7	0,6	1,9	1,5	1,5	11,7
Продольное	1,2	1,4	0,9	0,9	1,2	1,2	14,3
Перемещение наддрессорной балки (max), мм							
Вертикальное	20	23	26	18	21	24	8,7
Поперечное	12	15	19	13	15	18	7,7
Продольное	5	8	10	6	7	9	16,3



Рисунок 8 — Монтаж датчика регистрации скорости движения трамвая

Для регистрации измерений использовалась многоканальная совместимая с персональным компьютером измерительная электронная система Spider 8.

Эксперимент проводился на заранее выбранном участке трамвайных путей челночными рейсами со скоростями движения от 10 до 75 км/ч. Заезды проводились с тремя режимами загрузки: первый — порожний вагон, второй — 50%-я загрузка (5,9 т), третий — 100%-я (11,8 т). Нагружение обеспечивалось мешками с песком весом 350 Н каждый. При 50%-й загрузке мешки укладывали по 700 Н на каждое сиденье, а остальные — равномерно вдоль рядов сидений, имитируя стоящих пассажиров. При 100%-й загрузке трамвая мешки докладывались равномерно по всей площади пола.

Перемещения надрессорной балки трамвайного вагона, полученные в результате экспериментальных исследований, представлены на рис. 9.

По результатам эксперимента была проведена верификация разработанной математической модели движения трамвайного вагона (табл. 1).

Анализ табл. 1 показал, что для модели движения трамвайного вагона расхождение теоретических исследований с экспериментальными составляют 7—16%. То есть результаты экспериментальных исследований качественно и количественно соответствуют результатам теоретических. Следовательно, разработанная математическая модель с достаточной

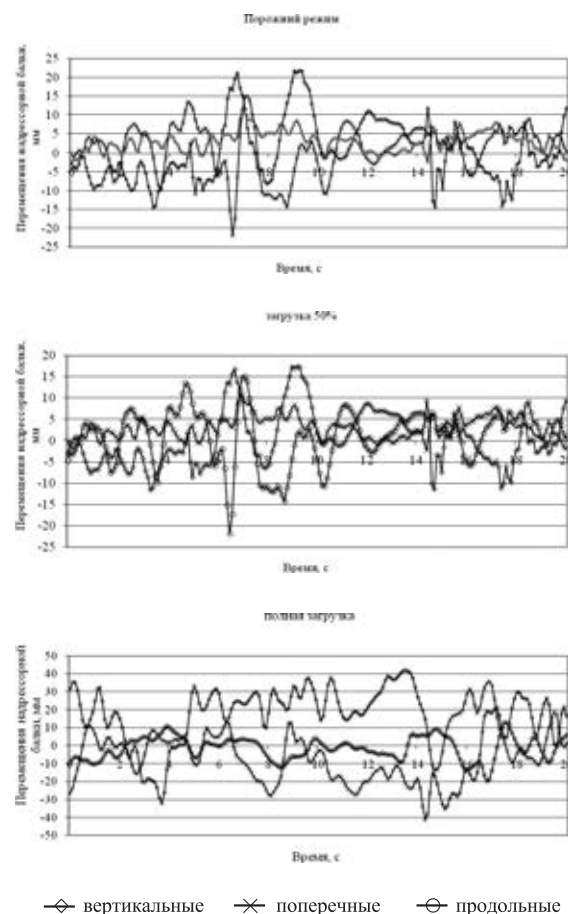


Рисунок 9 — Графики перемещений надрессорной балки трамвайного вагона:

точностью отражает реальное поведение трамвайного вагона и может быть использована для анализа динамической нагруженности и определения рациональных параметров ходовых частей как на стадии проектирования новых трамвайных вагонов, так и при модернизации уже существующих, эксплуатируемых во многих городах России.

Литература

1. Погорелов Д.Ю., Павлюков А.Э., Юдакова Т.А. Разработка математической модели железнодорожного экипажа в программной среде автоматизированного синтеза уравнений движения // Информационные технологии в моделировании и управлении : труды II Междунар. науч.-практ. конф., 20—22 июня 2000 г. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2000. С. 298—300.
2. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. М. : Машиностроение, 1977. 216 с.
3. Красниченко А.А. Методика определения упруго-диссипативных характеристик резиновых амортизаторов рельсового подвижного состава // Молодые ученые транспорта : труды науч.-техн. конф. / УрГУПС. Екатеринбург, 2007. С. 44—51.

References

1. Pogorelov D.Ju., Pavljukov A.E., Judakova T.A. Razrabotka matematicheskoj modeli zheleznodorozhnogo ekipazha v programnoj srede avtomatizirovannogo sinteza uravnenij dvizhenija [Development of railway vehicle's mathematical model in software envelope of automated synthesis of traffic control] // Informatsionnye tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: Trudy II Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf., 20—22 junja 2000 g. S-Pb.: Izd-vo SPbGTU, 2000g. S.298—300.
2. Poturaev V. N., Dyrda V. I. Rezinovye detali mashin. [Machine rubber parts] M.: Mashinostroenie, 1977. 216 s.
3. Krasnichenko A.A. Metodika opredelenija uprugodissipativnykh kharakteristik rezinovykh amortizatorov relsowego podvizhnogo sostava [Method of evaluating elastic-dissipative characteristics of rolling stock rubber mounting] // Molodye uchenye transportu: Trudy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ekaterinburg: URGUPS, 2007. S.44—51.

УДК 656.212.5:629.4.023.172

Николай Сергеевич Бачурин, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Станислав Евгеньевич Ляшенко, ассистент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНОВ МЕТОДОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Nikolai S. Bachurin, DSc, Professor of 'Railway cars' chair of the Ural State University of Railway Transport,
Stanislav E. Lyashenko, assistant of 'Cars' design and exploitation' chair of the Ural State University of railway Transport

Development Of A Model Of Cars Molded Pieces' Hardening Process By The Method Of Elasto-Plastic Deformation

Аннотация

Статья посвящена разработке математической модели, описывающей напряженно-деформированное состояние литых деталей вагона в процессе упрочнения методом упруго-пластической деформации. Описана методика, которая позволяет выбирать режимы упрочнения и прогнозировать результаты на стадии проектирования с помощью метода конечных элементов. По предложенной методике выполнено моделирование упрочнения центрирующей балки грузового вагона. Произведен многовариантный расчет с выбором оптимальных режимов упрочнения центрирующей балки.

Ключевые слова: упругопластическая деформация, остаточные напряжения, напряженно-деформированное состояние, свойства материала, конечный элемент, математическая модель.

Annotation

The article is devoted to the development of the mathematical model, describing stress-strain state of cars' molded pieces in the hardening process by the method of elasto-plastic deformation. In this work it is described the method, which allows to select modes of hardening and forecast the results on the designing stage using the finite elements method. By the suggested method the modeling of freight car centering bolster is carried out. The multi-variant calculation with the selection of optimal modes of centering bolster hardening is done

Key words: elasto-plastic deformation, residual voltage, stress-strain state, materials characteristics, finite element, mathematical model.

Успешное выполнение задач, поставленных перед железнодорожным транспортом, требует дальнейшего роста технического уровня подвижного состава, внедрения новых высокоэффективных конструкций грузовых и пассажирских вагонов, более интенсивного использования вагонного парка — ускорения оборота вагонов, увеличения скорости движения и массы поездов, повышения статической нагрузки вагонов. В связи с этим необходимо значительное повышение конструкционной прочности основных литых деталей грузового вагона: боковой рамы, надрессорной балки, корпуса автосцепки и ее центрирующей балки.

В настоящее время одними из способов повышения прочности, выносливости и долговечности литых деталей являются методы, основанные на использовании эффектов пластического деформирования [1]. Наиболее реальный и эффективный способ повышения усталостной прочности несущих литых деталей вагона — метод упругопластической деформации (УПД). Суть его заключается в том, что деталь на прессе подвергается деформированию статической нагрузкой по схеме эксплуатационного нагружения до появления в наиболее напряженных зонах незначительных пластических деформаций. Эти деформации после снятия нагрузки вызывают в указанных зонах формирование остаточных сжимающих напряжений обратного знака по сравнению с рабочими. В эксплуатации остаточные напряжения, суммируясь с рабочими, уменьшают их, повышая тем самым предел усталости деталей. Важно отметить, что этот способ обеспечивает наибольшее упрочнение в зонах концентрации напряжений. Например, если в наиболее нагруженных зонах детали имеются литейные дефекты, то вследствие повышенной деформации в этих зонах появляются и повышенные остаточные напряжения, уменьшающие влияние литейных дефектов как концентраторов напряжений на усталостную прочность деталей.

Несмотря на широкое применение упрочняющих операций, при производстве возникают затруднения в количественной оценке режимов упрочнения. Назначаемые технологические процессы, как правило, основываются на опыте или интуиции, которые не всегда приводят к наилучшим результатам.

Для внедрения этого метода упрочнения требуется создание методики, которая позволила бы оценить или спрогнозировать конечный результат упрочнения еще на стадии проектирования, рассчитать и выбрать оптимальные режимы упрочняющего нагружения без проведения натурного эксперимента. Создание подобной методики способствовало бы снижению металлоемкости и себестоимости выбора режимов упрочнения.

Ввиду сложности и большого объема расчетов, требуемых для выбора оптимального режима упрочнения, целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ) и компьютерное моделирование.

В классических расчетах напряженно-деформированного состояния с использованием МКЭ, как правило, достаточно указать модуль Юнга и коэффициент Пуассона. При этом считается, что материал исследуемой детали имеет абсолютно упругие свойства, линейные и изотропные во всем диапазоне испытываемых деформаций.

Несмотря на то что в большинстве случаев такая модель имеет простое решение и дает достаточно точный результат, этот подход неприменим для моделирования процессов, происходящих при УПД. В последнем случае необходимо учитывать пластические деформации, возникающие в материале. Для задания свойств материала необходимо использовать диаграмму растяжения, которая достаточно точно описывает упругопластические свойства материала. Ввиду того что свойства материала нелинейны, возникает нелинейная задача, которая достаточно сложна для решения и требует существенно больших затрат машинного времени, чем при классических расчетах напряженно-деформированного состояния.

Предлагаемая методика основана на методе компьютерного моделирования и позволяет произвести уточненный расчет прочностных свойств упрочненной детали и подобрать оптимальный режим упрочнения. Процесс моделирования состоит из таких этапов, как:

- создание модели, точно описывающей геометрию реальной детали;
- создание конечно-элементной модели исследуемой детали;
- задание нелинейных свойств материала исследуемой детали;
- моделирование процесса упрочнения;
- приложение граничных условий расчетных нагрузок к упрочненной детали (в соответствии с нормами расчета на прочность);
- оценка напряженно-деформированного состояния упрочненной конструкции;
- анализ результатов и корректировка режима упрочнения, при необходимости возвращение к моделированию процесса упрочнения.

Для проверки предлагаемой методики в качестве объекта исследования выбрана центрирующая балка автосцепки СА-3.

В соответствии с предложенной методикой была построена конечно-элементная модель центрирующей балки (рис. 1) с упругопластическими свойствами материала (рис. 2). Для создания конечно-элементной сетки использовался объемный 20-узловой конечный элемент [4].

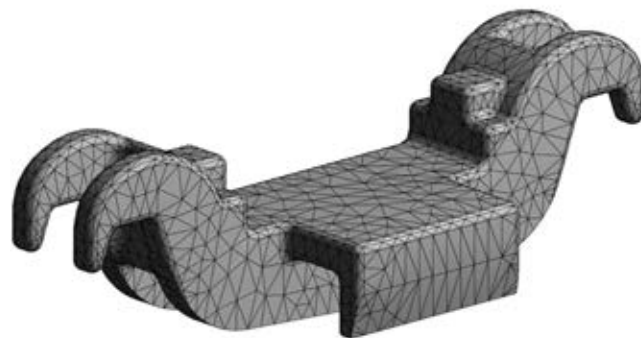


Рисунок 1 — Конечно-элементная модель центрирующей балки автосцепного устройства

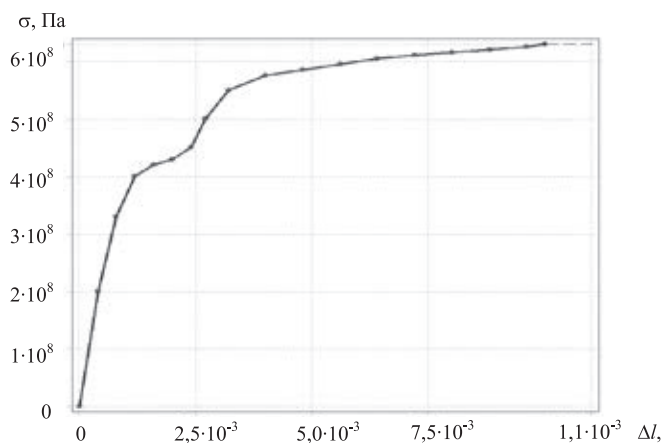


Рисунок 2 — Нелинейные свойства материала центрирующей балки

Граничные условия в модели заданы в соответствии с эксплуатационной схемой закрепления. На поверхностях, которыми балка опирается на маятниковые подвески, были созданы контактные конечные элементы, ограничивающие ее вертикальные перемещения. В качестве нагрузки на поверхность, на которой лежит автосцепка, была приложена распределенная нагрузка F , как показано на рис. 3.

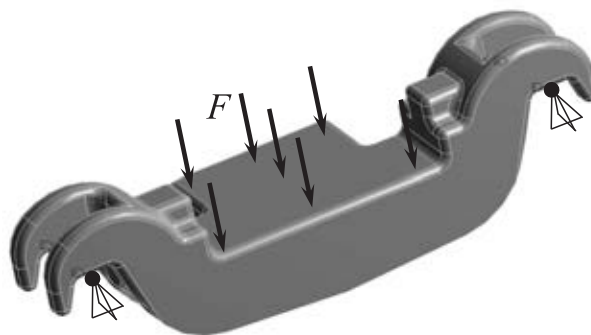


Рисунок 3 — Схема приложения нагрузок и закреплений

Процесс нагружения балки разбит на 5 этапов. Сила F задана в форме графика (рис. 4). Значение упрочняющей силы было подобрано экспериментально для создания оптимальных

остаточных напряжений. К концу первого этапа сила приобрела значение упрочняющей нагрузки, с первого по второй этап нагрузка полностью снималась до нуля. На третьем этапе нагрузка была равна нулю. На четвертом и пятом принимала эксплуатационное значение.

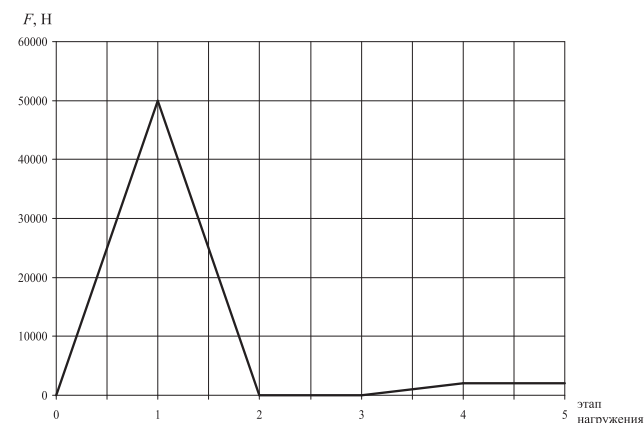


Рисунок 4 — График изменения приложенной нагрузки по этапам нагружения

По описанной методике было выполнено моделирование в программном комплексе ANSYS 13.0. В результате получены значения эквивалентных напряжений в центрирующей балке автосцепного устройства.

Напряженно-деформированное состояние неупрочненной центрирующей балки представлено на рис. 5. Максимальное значение напряжений составило $1,6 \cdot 10^7$ Па.

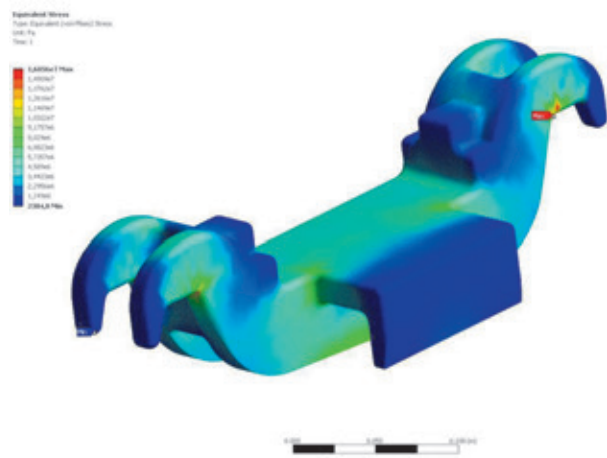


Рисунок 5 — Напряженно-деформированное состояние неупрочненной центрирующей балки от эксплуатационной нагрузки

Под воздействием упрочняющей нагрузки максимальное значение эквивалентных напряжений составило $1,97 \cdot 10^8$ Па.

Остаточные напряжения, возникающие после снятия упрочняющей нагрузки (рис. 6), составили $1,8 \cdot 10^7$ Па. В результате сложения значений остаточных напряжений с напряжениями, возникающими от эксплуатационной нагрузки, напряжения в упрочненной центрирующей балке составили $1,48 \cdot 10^7$ Па (рис. 7).

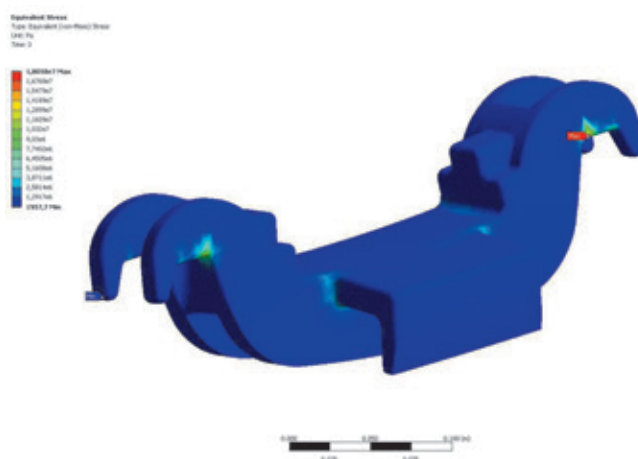


Рисунок 6 — Остаточные напряжения в центрирующей балке

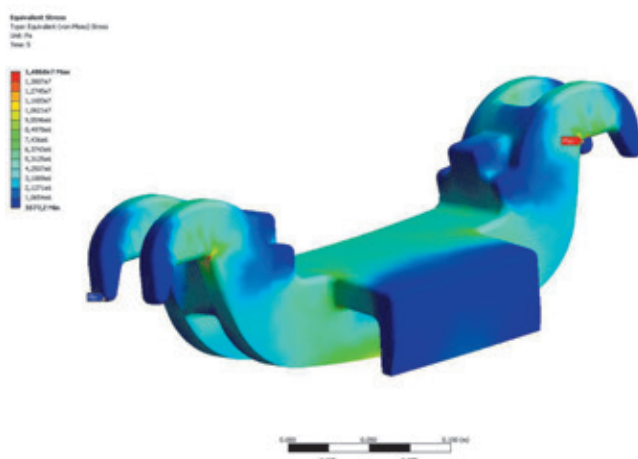


Рисунок 7 — Напряженно-деформированное состояние упрочненной центрирующей балки под действием эксплуатационной нагрузки

Для выбора оптимального значения упрочняющей силы был выполнен многовариантный расчет. В результате были получены таблица (табл. 1) и графики зависимости величины максимальных напряжений от шага нагружения при различных значениях упрочняющей силы (рис. 8), и график зависимости эксплуатационных напряжений от упрочняющей нагрузки (рис. 9).

Таблица 1 — Зависимость максимальных напряжений от упрочняющей нагрузки на каждом этапе нагружения.

Нагрузка, Н	2,5·10 ⁴	3,5·10 ⁴	4,5·10 ⁴	5,0·10 ⁴	5,5·10 ⁴	7,5·10 ⁴
Шаг						
1	1,00E+08	1,40E+08	1,79E+08	1,98E+08	2,16E+08	2,85E+08
2	6,31E+06	1,00E+07	1,47E+07	1,81E+07	2,24E+07	5,34E+07
3	6,31E+06	1,00E+07	1,47E+07	1,81E+07	2,24E+07	5,34E+07
4	1,66E+07	1,66E+07	1,62E+07	1,49E+07	1,58E+07	4,40E+07
5	1,66E+07	1,66E+07	1,62E+07	1,49E+07	1,58E+07	4,40E+07

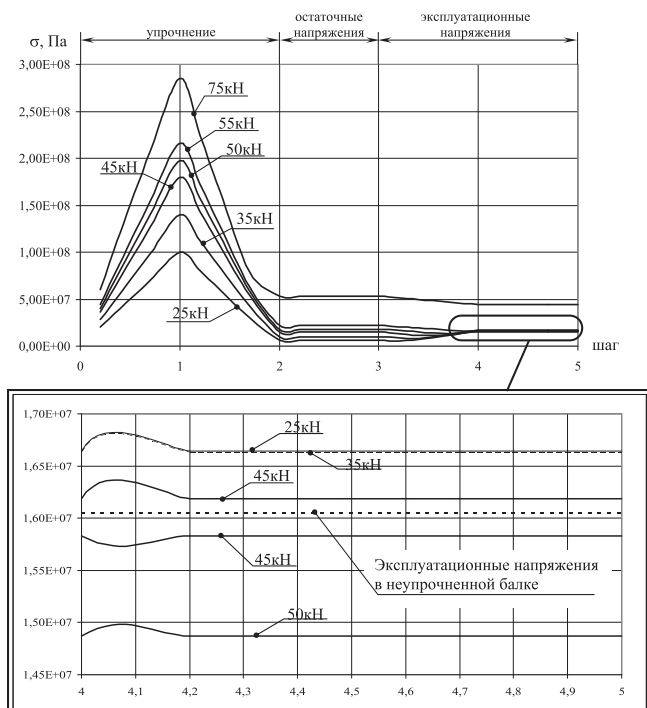


Рисунок 8 — Графики зависимости максимальных напряжений в центрирующей балке от шага нагружения в процессе упрочнения

Из графиков видно, что оптимальной является упрочняющая нагрузка со значением 50 кН, при этом остаточные напряжения составляют $1,8 \cdot 10^7$ МПа, а эксплуатационные напряжения $1,49 \cdot 10^7$ МПа. Эксплуатационные напряжения в неупрочненной центрирующей балке составляют $1,6 \cdot 10^7$ Па, что на 8% больше, чем напряжения в упрочненной центрирующей балке.

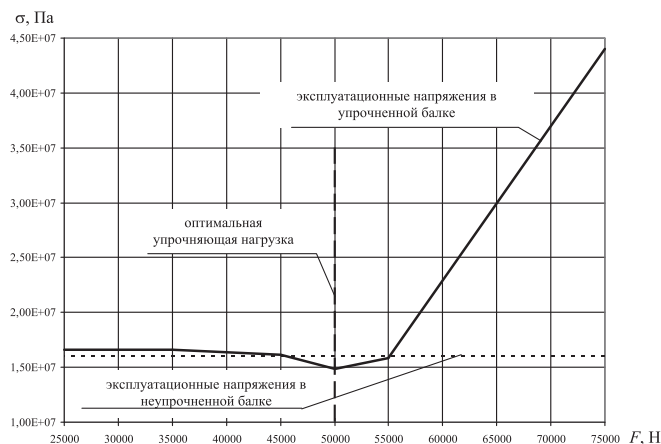


Рисунок 9 — График зависимости эксплуатационных напряжений от упрочняющей нагрузки

Результаты моделирования показали, что предложенная методика дает возможность оценить остаточные напряжения, возникающие в литых деталях после упрочнения, а также оценить напряженно-деформированное состояние упрочненной литой детали, что, в свою очередь, позволяет выбирать оптимальные режимы упрочнения без проведения натурного эксперимента.

С помощью представленной методики было показано, что напряжения, возникающие от эксплуатационной нагрузки, в упрочненной центрирующей балке на 8% меньше, чем напряжения, возникающие в неупрочненной.

В заключение следует отметить, что разработанная модель дает возможность на стадии проектирования производить выбор параметров упрочнения методом УПД литых деталей вагонов, что позволяет снизить металлоемкость и стоимость проектных работ. Кроме того, упрочнение литых деталей повышает их усталостную прочность и продляет срок службы.

Литература

1. Шалин В.Н. Расчет упрочнения изделий при их пластической деформации. Л.: Машиностроение, 1971. 192 с.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.

References

1. Shalin V.N. Raschet uprochneniya izdelij pri ikh plasticheskoj deformatsii. [Calculation of goods hardening by their plastic deformation]. L.: Mashinostroenie, 1971g. 192 s.
2. Gallager R. Metod konechnykh elementov [Finite elements method]. Osnovy. Perevod s angl. M.: Mir, 1984. 428s.

УДК 332.1: 338.47:656

Александр Александрович Смотаев, доктор биологических наук, профессор кафедры биологии и экологии Уральской государственной академии ветеринарной медицины (Троицк)
Михаил Борисович Петров, доктор экономических наук, руководитель центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения РАН, Екатеринбург,
Юрий Анатольевич Дорошенко, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой экономики и организации сельскохозяйственного производства Челябинского государственного агроинженерного университета

СИСТЕМНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА СВЕРДЛОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Aleksandr A. Samotayev, DSc, professor of 'Biology and ecology' chair, The Ural State Academy of Veterinarian Medicine, Troitsk, Chelyabinsk Region.
Mikhail B. Petrov, DSc, Head of Production Forces' development and placement of the Institute of Economics of the Russian Academy of Science (the Ural Branch). Ekaterinburg
Yuriy A. Doroshenko, PhD, associate professor, head of a chair 'Economics and agricultural manufacturing organization', Chelyabinsk State Agro-Engineering University, Chelyabinsk

Statistical Analysis Of Freight Departure And Arrival On Sverdlovsk Railway

Аннотация

С помощью специально разработанного статистического алгоритма системного анализа рассмотрены статистические закономерности структурных взаимодействий в системе показателей отправления и прибытия агрегированных грузов на отделениях Свердловской железной дороги. На основании построенных моделей и их анализа доказано наличие зависимости, формирующей структурные элементы, что позволяет говорить о наличии системы показателей, отражающих систему потоков массовых грузов между районами тяготения отделений дороги. Предложенный методический подход дает возможность установить отношения причинности в формировании закономерностей конфигурации и мощности потоков, т. е. использовать железнодорожную статистическую отчетность для получения достоверной информации о межтерриториальных связях по поставкам, образующим грузопотоки. В терминах статистических показателей выявлены «проблемные» потоки и потоки, наиболее значимые для поддержания системного единства изучаемого полигона. Разработанный подход позволяет не только обнаружить проблемные точки на отделениях железной дороги при перемещении грузов, но и дает возможность управлять эффективностью потоков с помощью моделей подсистем, улучшая их состояние, что расширяет сферу применения используемого класса моделей.

Ключевые слова: структура массива показателей, системообразующие свойства, ресурсодефицитность и ресурсоизбыточность элементов системы показателей, активирующие и заключительные показатели, хаос и порядок в системе показателей.

Annotation

With the help of specially developed statistic algorithm of statistical analysis in the article they are studied statistical regularities of structural interactions in the indexes' system of departure and arrival of aggregated freight on Sverdlovsk railway departments. On the basis of built models and their analysis it is proved that there are dependences, forming the structural elements and therefore allowing to say about the system of indexes, reflecting the system of mass freight flows between the gravitation fields of railway departments. The offered methodical approach gives the possibility to establish casual relations in forming regularities of flows configuration and rate, notably to use railway report statistics for getting true data about inter-territory relations on supplies, which form the freight flows. In terms of statistical indexes the 'problematic' flows and flows, which are the most significant for supporting systemic unity of the studied ground are shown up. The developed approach allows both to identify the problematic points on railway departments when cargo moving and to control flows efficiency with the help of sub-systems models, improving their state, which expand the application sphere of the used models class.

Key words: structure of indexes array, system-forming characteristics, resources deficit and excessiveness of elements of indexes' system, activating and closing indexes, chaos and order in indexes system.

Проблема управления такими сложными объектами, как грузовые потоки на железнодорожном транспорте, в условиях трансформации экономики — сложный и малоизученный вопрос. В значительной степени это обусловлено недостаточной разработанностью теоретико-методологического и методического подходов, в первую очередь с позиций системного подхода [1].

В качестве одного из методов решения задачи по формированию среды объектов предложен иерархический подход, в рамках которого процессы, происходящие на различных уровнях иерархии и испытывающие прямое и обратное влияние других уровней, исследуются системно [2].

Иерархическую систему управления определяют как систему, имеющую многоуровневую структуру в функциональном, организационном или каком-либо ином плане. Вместе с тем при решении практических задач анализа тех или иных систем до-

статочным оказывается выделение ограниченного числа ступеней иерархии. При этом системы низшего уровня являются подсистемами систем более высокого уровня, которые, в свою очередь, представляют подсистемы систем еще более высокого уровня, и т. д. вплоть до так называемой суперсистемы, находящейся на верхней степени иерархической структуры [3].

Материал и методика исследований. Оценку структурных взаимосвязей грузовых потоков на Свердловской железной дороге производили в виде матрицы данных за 2005 г., в которой на оси X представлен вес агрегированных грузов, *отправляемых и принимаемых* отделениями Свердловской железной дороги, для Пермского, Нижнетагильского, Свердловского, Тюменского и Сургутского отделений, а на оси Y — наименование 14 *агрегированных грузов*, отправляемых и принимаемых перечисленными отделениями Свердловской железной дороги.

Результаты исследований. Общеизвестно, что ведущим условием наличия системы для показателей того или иного объекта является *присутствие структуры*, определяемой В.Ф. Сержантовым как «совокупность элементарных объектов и таких материальных взаимодействий между ними, благодаря которым данная совокупность образует единый материальный объект со своей качественной и пространственно-временной определенностью» [4].

Только *наличие структуры* создает условия для образования системы в виде формирования пространства, уровней и специфических каналов взаимодействия. Объект может быть целостным, но несистемным, ибо не обладает структурой [5].

Как оказалось, анализируемая матрица данных отправки и получения грузов отделениями Свердловской железной дороги содержит структуру как по оси X, так и по оси Y, позволяя тем самым использовать методы матричного анализа [6]. При этом в первом случае необходимо говорить о *проблемах отделений железной дороги*, а во втором — о *проблемах перевозимых агрегированных грузов*.

Инструментом обнаружения структуры выступает *метод главных компонент*, входящий в группу «структурных или многомерных методов анализа» [7].

Образование и существование *структуры* происходит благодаря ряду закономерностей. Важнейшая из них — придание системой более высокого уровня показателям *системообразующих* (ресурсодефицитных) и *системоразрушающих* (ресурсоизбыточных) свойств [3].

Основной характеристикой элемента в системе служит его способность к установлению связей, т. е. порождению (генерации) или восприятию (поглощению) множества связей определенного вида. Общее количество связей (входящих или исходящих), которые способен образовать элемент, можно назвать его *валентностью*. Однако эта способность элементов, рассматриваемых вне системы, находится в потенциальном состоянии и актуализируется только при включении их в систему [8].

Обнаружение ресурсодефицитных и ресурсоизбыточных свойств элементов производят с помощью *корреляционного анализа* на основании закономерности, согласно которой отрицательные (обратные) корреляционные связи укрепляют, а положительные — разрушают структуру большой системы. При этом в матрице полученных корреляций рассчитывают их суммы для каждого показателя, располагаемые затем последовательно слева направо согласно знаку, определяя попутно и

ресурсы структуры как сумму парных корреляций между всеми элементами эшелона, представленных численно в усл. ед.

На следующем этапе с помощью *факторного анализа* выделяли подсистемы эшелона. Каждая из них формируется из имеющегося набора крайних слева (системообразующих) и справа (системоразрушающих) в ряду элементов на основе принципа «минимального насыщения», создавая тем самым возможность максимальной реализации задач объекта.

Порядок размещения элементов в каждой из обнаруженных подсистем производится на основании сумм модуля парных корреляций в матрице взаимодействия показателей, располагаемых слева направо в порядке убывания. При этом *элемент с минимальной суммой*, будучи наиболее независимым, является показателем *активизации*, путем изменения ресурсных возможностей которого происходит автоматический запуск системы. *Элемент с максимальной суммой*, будучи наиболее зависимым, является *итогом деятельности* подсистемы, для которого через множественное регрессионное уравнение *строится стандартная и наилучшая модель* [9].

Ресурсную связь в подсистеме между элементом активизации и итог деятельности выполняет *промежуточный элемент*, число которых определяется «давлением» окружающей среды.

Ресурсы подсистем устанавливали по результатам построения регрессионной модели для их заключительного элемента, рассчитывая в баллах, согласно разработанной методике, от -5 до 5 [1]. Особое значение при этом имеет знак перед элементами уравнения. Положительный свидетельствует о поступлении ресурсов в структуру элемента подсистемы (→), отрицательный — об их удалении (←).

Формирование вышестоящего эшелона осуществлялось на основании эффекта «черного ящика», когда элементы активизации и итог деятельности подсистем нижнего уровня поднимались структурно вверх и из них организуется новый эшелон, в котором производится аналогичный расчет.

В результате мы получаем идеализированную систему, где два показателя (отправление и прибытие грузов), отражающих проблемы пяти отделений Свердловской железной дороги, формируются в большую систему, содержащую три подсистемы, в виде двухэшелонной пирамиды (рис. 1).

Пирамидальная система, как известно архитекторам, — наиболее устойчивая конструкция. Ее труднее всего разрушить [10].

По горизонтали пирамиды представлены подсистемы, а по вертикали — их эшелоны. В подсистемах эшелонов номерами обозначены наиболее важные показатели: в левом верхнем углу — элементы активизации, величины которых необходимо изменять, чтобы запустить подсистему; в правом нижнем углу — итог деятельности подсистемы. При этом чем выше уровень подсистем в пирамиде, тем выше их значимость и важность образующих их элементов в деятельности анализируемого объекта. А стрелки показывают направление управления подсистемами [11].

При объяснении полученных результатов выдвинута гипотеза, согласно которой эшелоны пирамиды в рассматриваемом случае отражают проблемы, связанные с управлением Свердловской железной дороги, возникающие в процессе обработки грузов: на отделениях дороги (основание пирамиды) → всей железной дороги.

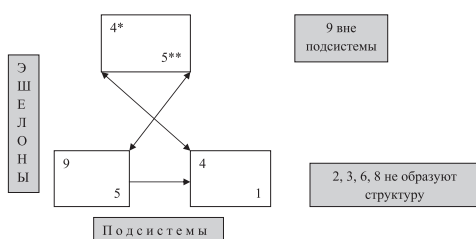


Рисунок 1 — Синергетические взаимоотношения подсистем и эшелонов в системе отделений Свердловской железной дороги:
* — элемент активизации; ** — итог деятельности

Как оказалось, структура эшелона «отделения» Свердловской железной дороги не содержит ресурсодефицитных (системообразующих) показателей (табл. 1).

Таблица 1 — Ресурсодефицитные и ресурсосодержащие элементы в системе Свердловской железной дороги

№	Показатель	Эшелоны пирамиды*	
		Отделения дороги	Управление дороги
Пермское отделение			
1	Отправление	3,019 ⁵	0,764 ⁴
2	Прибытие	5,405 ¹⁰	-
Нижнетагильское отделение			
3	Отправление	2,661 ⁴	-
4	Прибытие	1,957 ²	-0,116 ¹
Свердловское отделение			
5	Отправление	4,734 ⁷	0,488 ³
6	Прибытие	2,460 ³	-
Тюменское отделение			
7	Отправление	4,479 ⁵	-
8	Прибытие	5,162 ⁹	-
Сургутское отделение			
9	Отправление	0,947 ¹	0,248 ²
10	Прибытие	4,988 ⁸	-
Индекс системообразования ($\Sigma_{\text{системообразующие}} / \Sigma_{\text{системоразрушающие}}$)		-	0,077
Ресурсное наполнение		3,581 ± 0,494	0,346 ± 0,187

* Сумма и место, занимаемое показателем в структуре эшелона объекта, ресурсы элемента.

Их отсутствие свидетельствует об *отсутствии системного взаимодействия между отделениями* Свердловской железной дороги, что подтверждает форма распределения ресурсного наполнения отделений (рис. 2), а также величины критериев нормальности: $As = -0,360$, $Ex = -1,358$.

В целом ресурсное наполнение структуры эшелона было положительным и составило $3,581 \pm 0,484$ усл. ед.

Ресурсосодержащими были все 10 характеристик — 100,0%. Минимальный запас присутствует у показателя «отправление грузов» с Сургутского отделения (0,947), максимальный — «прибытие» грузов в Пермское отделение (5,405).

Как видно, структура всех отделений дороги ресурсоизбыточна (особенно в интервале 4—5 усл. ед.), что выражается материально в виде значительного скопления на станциях отделений агрегированных грузов. В первую очередь это ка-

сается «прибывающих» грузов для Пермского (5,405), Тюменского (5,162) и Сургутского отделений (4,988).

Более низкий уровень ресурсов структуры наблюдается для «отправления» грузов с Сургутского отделения, их «прибытия» в Нижнетагильское и Свердловское отделение (1,957 и 2,460).

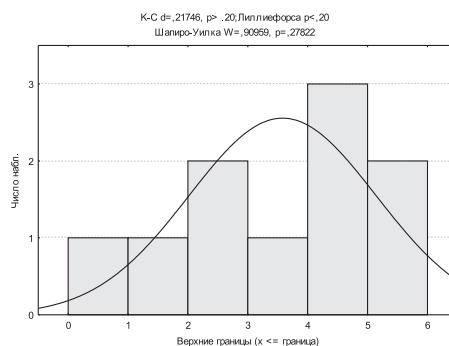


Рисунок 2 — Гистограмма и график плотности распределения ресурсов структуры «отделений» Свердловской железной дороги

В эшелоне «отделения» вышестоящей системой формируются две подсистемы (66,7% теоретического уровня), в которых модели заключительных (проблемных) элементов представлены следующим образом (табл. 2).

Таблица 2 — Модели заключительных элементов подсистем в системе отделений Свердловской железной дороги

№ под-системы	Вид уравнения	Адекватность модели	
		F _{фактич.}	F _{наилуч.}
Отделения			
1	$Y_5 = 370879,1 - 0,292 X_9 + 1,613 X_{10}$	258,0*	258,0*
2	$Y_1 = 1759749,9 - 0,249 X_4 + 4,951 X_7$	4,93*	9,27*
Свердловская железная дорога			
3	$Y_5 = -4237,32 - 0,31 X_4 + 0,44 X_1$	1,57	2,38

Будучи адекватными согласно критерию Фишера ($F_5 = 258,0$, $p = 0,000000006$; $F_1 = 4,93$, $p = 0,003$), они свидетельствуют, что ведущими проблемами эшелона являются «отправление» грузов с Пермского и Свердловского отделений.

Расчеты ресурсного наполнения свидетельствуют об их дефицитности в структурах подсистем первого и второго порядка ($-0,333$ усл. ед.).

Отметим и тот факт, что при удалении из наилучшей модели показателя «отправление» грузов Пермским отделением (X_1) зависимая переменная (Y_5) меняет свою ресурсную ориентацию с выделения на поглощение.

Ввиду ресурсной слабости показатели «прибытие» грузов в Пермское отделение, «отправление» с Нижнетагильского, «прибытие» на Свердловское и Тюменское отделения не имели структуру, что не позволило им организовать подсистему.

Для исправления создавшегося положения с учетом избытка ресурсов структуры рекомендуется интенсифицировать уровень ресурсного наполнения, что приведет к улучшению положения с *отправкой* грузов с Сургутского отделения, *разгрузкой* поступающих грузов Нижнетагильского отделения.

При рассмотрении управляющего эшелона оказалось, что в его в структуре присутствует один системообразующий элемент в виде «прибытие» грузов в Нижнетагильское отделение (–0,116) — 25,0%, остальные три элемента являются ресурсоизбыточными (см. табл. 1).

Минимально избыточным было «отправление» грузов с Сургутского отделения (0,248), максимально избыточным — с Пермского отделения (0,764).

Присутствие системообразующего элемента свидетельствует о повышении степени взаимодействия между отделениями Свердловской железной дороги на уровне управляющего эшелона, что подтверждает форма распределения ресурсного наполнения отделений, (рис. 3), а также снижение величин критериев нормальности: $As = -0,302$, $Ex = -0,355$.

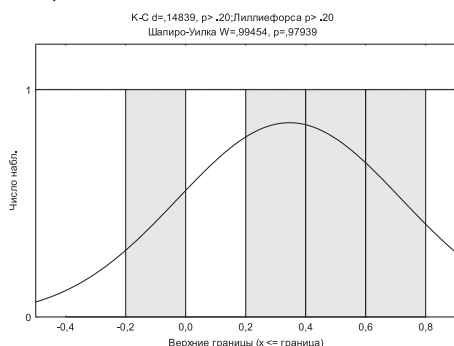


Рисунок 3 — Гистограмма и график плотности распределения ресурсного наполнения структуры «управление» Свердловской железной дороги

Индекс стабильности эшелона был весьма слабым (0,077), что свидетельствует о его низкой устойчивости. В целом ресурсное наполнение структуры эшелона было положительным и составило $0,346 \pm 0,187$ усл. ед.

Можно констатировать, что причиной быстрой обработки грузов в Нижнетагильском отделении был *дефицит подвижного состава*, а скопления грузов в Пермском отделении — их *длительная обработка*.

Модель управляющей подсистемы свидетельствует, что ведущей проблемой всей Свердловской железной дороги является «отправление» грузов с одноименного отделения. Это усугубляется ресурсной несовместимостью (конкуренцией) «отправления» грузов с Пермского отделения, неадекватностью модели и высоким дефицитом ресурсов структуры управляющей подсистемы (–1,333).

Эффективность деятельности производственно-экономических объектов во многом определяется соотношением «хаоса» и «порядка» между подсистемами пирамиды большой системы. В идеале оно должно стремиться к «золотому сечению» (38: 62).

В системе «отделения Свердловской железной дороги» между подсистемами это соотношение составляло 66,7% и было в 1,76 раза выше нормы. Высокий уровень «хаоса» ведет к нестабильности функционирования рассматриваемого объекта.

Структурное содержание «хаоса развития» на 100% обеспечивается энергетическими ресурсами, отражающими финансовые потоки, вкладываемые руководством дороги в развитие отрасли (рис. 4).

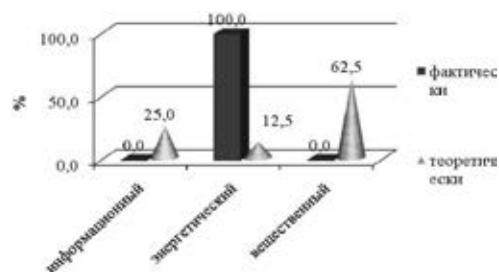


Рисунок 4 — Структура «хаоса развития» в системе отделений Свердловской железной дороги

Однако для успешной реализации вложений необходимо их правильное сочетание с информационными и вещественными потоками, чье полное отсутствие резко снижает эффективность финансовых вложений.

Отметим, что контроль управляющего эшелона над нижележащим в пирамиде системы над элементом активизации «отправление» грузов с Сургутского отделения, а также итог деятельности в виде «отправления» грузов с Пермского отделения отсутствует в должной степени (см. рис. 1).

Рассмотрев результаты отправки и поступления грузов с позиций «отделений» Свердловской железной дороги (ось X), перейдем к их анализу с позиций «агрегированных грузов» (ось Y), что возможно после транспонирования матрицы и при наличии в ней структуры.

Как оказалось, 14 показателей, отражающих наименования агрегированных грузов, формируются в большую систему, содержащую семь подсистем в виде трехэшелонной пирамиды (рис. 5).

При объяснении полученных результатов выдвинута гипотеза, согласно которой эшелоны пирамиды в рассматриваемом случае отражают проблемы, связанные с управлением и прибытием грузов, возникающие на станциях отделений (основание пирамиды) → отделениях дороги → Свердловской железной дороге.

Структура эшелона «грузы станций» содержит два ресурсодефицитных (системообразующих) показателя, или 14,3% (табл. 3).

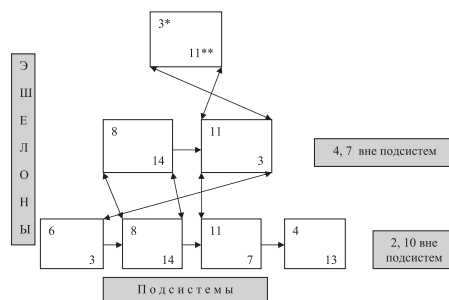


Рисунок 5 — Синергетические взаимоотношения подсистем и эшелонов в системе перевозок агрегированных грузов Свердловской железной дороги:

* — элемент активизации; ** — итог деятельности

Максимально ресурсодефицитным оказался показатель «нефтяные грузы» (–1,326), минимально ресурсодефицитным — «трубы» (–0,371), что вызвано, по-видимому, дефицитом подвижного состава.

Таблица 3 — Ресурсодефицитные и ресурсосодержащие элементы в системе «агрегированных грузов», перемещаемых по Свердловской железной дороге

№	Показатель	Эшелоны		
		Грузы на станциях	Грузы на отделениях	Грузы управления эшелона
1	Уголь каменный	1,695 ³	-	-
2	Кокс каменный	3,754 ⁷	-	-
3	Нефтяные грузы	-1,326 ¹	-0,179 ²	-0,639 ¹
4	Руда ЧМ	2,946 ⁵	0,033 ³	-
5	Руда ЦМ	4,123 ¹¹	-	-
6	Чугун	4,005 ¹⁰	2,123 ⁷	-
7	Сталь в слитках и стальная заготовка	3,808 ⁸	0,855 ⁴	-
8	Трубы	-0,371 ²	-0,189 ¹	0,567 ²
9	Прокат	5,282 ¹³	-	-
10	Лесные грузы	4,872 ¹²	-	-
11	Цемент	4,002 ⁹	1,903 ⁶	1,121 ⁴
12	Минерально-строительные грузы	3,174 ⁶	-	-
13	Удобрения	1,844 ⁴	1,291 ⁵	-
14	Другие грузы	5,816 ¹⁴	2,532 ⁸	0,728 ³
Индекс системообразования		0,037	0,042	0,264
Ресурсное наполнение		3,116±0,545	1,046±0,384	0,445±

Системообразующие свойства отмеченных грузов вызваны их обособленностью при формировании эшелонов на конечных станциях, что подтверждает форма распределения ресурсного наполнения отделений (рис. 6), а также величины критериев нормальности: $As = -1,022$, $Ex = 0,619$.

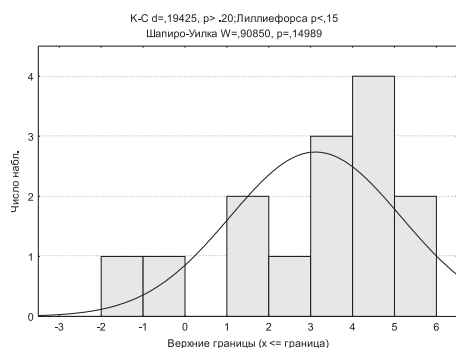


Рисунок 6 — Гистограмма и график плотности распределения ресурсного наполнения структуры грузов, поступающих и отправляемых со станций Свердловской железной дороги

Ресурсосодержащими были 12 характеристик — 85,7%. Минимальный запас присутствует у показателя «каменный уголь» (1,695), максимальный — у показателя «другие грузы» (5,816).

Как видно, структура большинства отправляемых и принимаемых грузов преимущественно ресурсизбыточна (особенно в интервале 4—5 усл. ед.), что выражается в виде значительного скопления на станциях ряда агрегированных грузов.

В первую очередь это касается таких наименований, как «другие грузы», «прокат», «лесные грузы».

Более низкий уровень ресурсов структуры наблюдается для грузов «каменный уголь», «удобрения», «руда ЧМ», свидетельствуя о приоритетности, помимо грузов «трубы» и «нефтяные грузы», их обработки.

Индекс системообразования был очень низким (0,037), что говорит о слабости эшелона, его готовности к разрушению, ресурсное наполнение было положительным и достаточно высоким: $X = 3,116 \pm 0,545$ усл. ед.

В эшелоне «станции» вышестоящей системой формируются четыре подсистемы (80,0% теоретического уровня), в которых модели заключительных (проблемных) элементов представлены следующим образом (табл. 4).

Таблица 4 — Модели заключительных элементов подсистем в системе «агрегированных грузов», перевозимых Свердловской железной дорогой

№ подсистемы	Вид уравнения	Адекватность модели	
		$F_{\text{факт.}}$	$F_{\text{наилуч.}}$
Станции			
1	$Y_3 = 2568763,2 + 13,81 \cdot X_6 - 0,78 \cdot X_5$	1,91	1,91
2	$Y_{14} = 1514578,7 + 0,67 \cdot X_8 + 1,74 \cdot X_9$	4,90*	8,85*
3	$Y_7 = -2410,8 + 0,63 \cdot X_{11} + 0,07 \cdot X_1$	0,59	-
4	$Y_{13} = 572279,3 - 0,151 \cdot X_4 + 0,146 \cdot X_{12}$	0,23	-
Отделения			
5	$Y_{14} = 1724055,3 + 0,602 \cdot X_8 + 13,8 \cdot X_6$	9,42*	9,42*
6	$Y_3 = 3247174,9 - 2,76 \cdot X_{11} + 0,74 \cdot X_{13}$	6,95*	6,95*
Управление			
7	$Y_{11} = -5884,6 - 0,003 \cdot X_3 + 0,14 \cdot X_{14} + 0,46 \cdot X_8$	9,91*	17,2*

Как видно, не являясь адекватными, за исключением подсистемы второго порядка, они свидетельствуют, что ведущими проблемами эшелона «станции» является отправление и прием следующих грузов: нефтяные грузы → другие грузы → сталь в слитках и стальная заготовка → удобрения. Причем для последних двух зависимых переменных ввиду ресурсной слабости не удастся создать наилучшие модели.

Расчеты ресурсного наполнения свидетельствуют об их избыточности в структурах подсистем эшелона: $X = 1,000$ усл. ед.

При создании наилучшей модели в подсистеме второго порядка ввиду ресурсной слабости был исключен элемент «трубы», а «кокс каменный» и «лесные грузы» не вошли в состав подсистем эшелона.

Структура эшелона «грузы» на «отделениях» содержит два ресурсодефицитных (системообразующих) показателя, или 25,0% (см. табл. 3).

Максимально дефицитный — «трубы» (-0,189), минимально дефицитный — «нефтяные грузы» (-0,179), что, несомненно, вызвано недостаточным количеством подвижного состава. В сравнении с предыдущим уровнем недостаток ресурсов сохранился для тех же элементов, они лишь поменялись местами, снизив остроту дефицитности с 3,57 до 1,06 раза.

Итак, на «станциях» Свердловской железной дороги наибольший дефицит ресурсов связан с переработкой «нефтяных грузов», на отделениях — с показателем «трубы».

Системообразующие свойства отмеченных грузов вызваны их повышенной численностью при формировании эшелонов на отделениях, что подтверждает форма распределения ресурсного наполнения отделений (рис. 7), а также величины критериев нормальности: $As = 0,06$, $Ex = -1,841$.

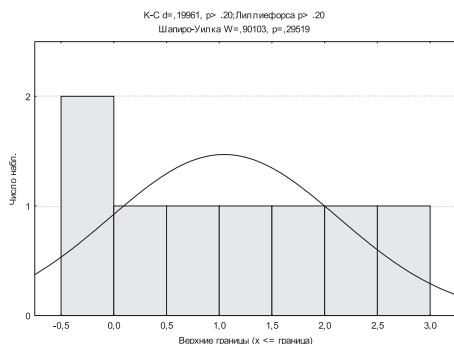


Рисунок 7 — Гистограмма и график плотности распределения ресурсного наполнения структуры грузов, поступающих и отправляемых с отделений Свердловской железной дороги

Ресурсосодержащими были шесть характеристик — 75,0%. Минимальный запас присутствует у показателя «руда ЧМ» (0,033), максимальный — у показателя «другие грузы» (2,532).

Как видно, структура большинства отправляемых и принимаемых грузов, распределяясь равномерно, преимущественно ресурсоизбыточна, что выражается скоплением на отделениях железной дороги некоторых агрегированных грузов, в первую очередь таких, как «другие грузы», «чугун», «цемент». Более низкий ресурс содержится в структуре грузов «руда ЧМ», «сталь в слитках и стальная заготовка».

Системообразующий индекс хотя и вырос в 1,14 раза по сравнению с основанием пирамиды, был весьма слабым (0,042), ресурсное наполнение было положительным: $\bar{X} = 1,046 \pm 0,384$ усл. ед.

В эшелоне «отделения» вышестоящей системой формируются две подсистемы (100% теоретического уровня), в которых модели заключительных (проблемных) элементов представлены следующим образом (табл. 4).

Будучи адекватными согласно критерию Фишера они свидетельствуют, что ведущими проблемами эшелона «отделения» являются отправление и прибытие: «другие грузы» → «нефтяные грузы».

Расчеты ресурсного наполнения свидетельствуют об их избыточности в структурах подсистем эшелона: $\bar{X} = 0,834$ усл. ед.

При этом ввиду ресурсной слабости грузы «руда ЧМ», «сталь в слитках и стальная заготовка» не вошли в состав подсистем эшелона.

При рассмотрении управляющего эшелона оказалось, что в его в структуре присутствует один системообразующий элемент — «нефтяные грузы» (25,0%); остальные три элемента являются ресурсоизбыточными (см. табл. 3).

Здесь минимально избыточным был груз «трубы» (0,567), максимально наполнен «цемент» (1,121).

Системообразующие свойства отмеченных грузов вызваны их обособленностью при формировании эшелонов на конечных станциях, что подтверждает форма распределения ресурсного наполнения отделений (рис. 8), а также величины критериев нормальности: $As = -1,430$, $Ex = 2,529$.

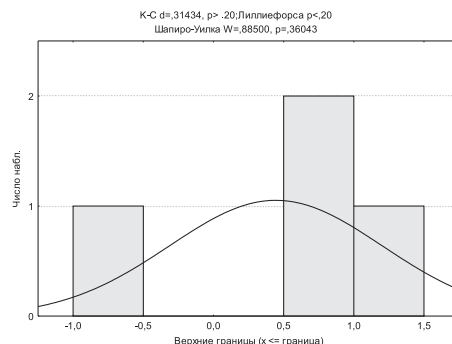


Рисунок 8 — Гистограмма и график плотности распределения ресурсного наполнения структуры «грузов» в эшелоне управления Свердловской железной дороги

Индекс стабильности эшелона хотя и вырос в 6,4 раза (до 0,264), но остается низким, что говорит о его неустойчивости. В целом ресурсное наполнение структуры эшелона было положительным и составило $0,445 \pm 0,379$ усл. ед.

Адекватная модель управляющей подсистемы свидетельствует, что ведущей проблемой Свердловской железной дороги является снижение уровня обработки «цемента». Это усугубляется ресурсной конкуренцией с «нефтяными грузами» и дефицитом ресурсов структуры управляющей подсистемы (-0,750).

В системе обрабатываемых агрегированных грузов Свердловской железной дороги соотношение «хаоса» и «порядка» между подсистемами составило 28,6% и было в 1,33 раза ниже нормы. Низкий уровень «хаоса» ведет к застою функционирования рассматриваемого объекта.

Структурное содержание «хаоса развития» обеспечивает по 50% информационными и энергетическими ресурсами (рис. 9).

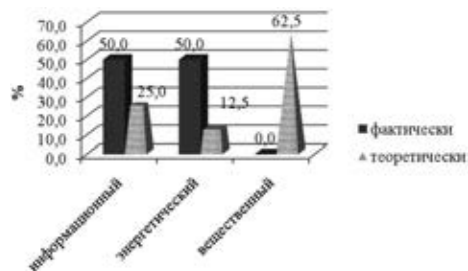


Рисунок 9 — Структура «хаоса развития» в системе агрегированных грузов Свердловской железной дороги

Однако для успешной реализации вложений необходимо их правильное сочетание вещественными потоками, полное

отсутствие последних, а также превышение уровня информационного потока снижает эффективность финансовых вложений в развитие железной дороги.

Отметим, что контроль эшелонов над нижележащими уровнями в пирамиде системы отсутствует в должной степени. В частности, нет управляющего эшелона над подсистемой первого порядка, нет эшелона «отделения», где элементом активизации является груз «трубы», а ее итогом — «другие грузы»; нет эшелона «отделения» над элементом активизации подси-

стемы первого порядка «чугун». Итогом деятельности в подсистеме третьего порядка выступает «сталь в слитках и стальная заготовка», а в подсистеме четвертого порядка элементом активизации выступает «руда ЧМ», а ее итогом — «удобрения» (см. рис. 5).

Слабость или отсутствие контроля ведет к дестабилизации функционирования системы и отдельных ее элементов, снижению эффективности, повышению ресурсных затрат на выполнение основных задач системы.

Литература

1. Гизатуллин Х.Н., Ризванов Д.А. Проблемы управления сложными социально-экономическими системами. Екатеринбург : Экономика, 2005. 218 с.
2. Катаева Ю.В. Построение эффективной системы взаимодействия субъектов регионального жилищного строительства: иерархический подход : труды Всерос. Симп. по экон. теории. Т. II. Мезоэкономика, макроэкономика. Екатеринбург, 2008, С. 80—83.
3. Крайзмер Л.П. Кибернетика : учеб. пособие для с.-х. вузов. М. : Агропромиздат, 1985. 256 с.
4. Бундзен П.В. Методологические аспекты использования факторного анализа в нейрофизиологии / Бундзен П.В., Каплуновский А.С., Клименко В.М., Корнеева Е.А. // Методологические вопросы теоретической медицины. Л. : Медицина, 1975. С. 25—29.
5. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие. Киев : МАУП, 2003. 368 с.
6. Симчера В.М. Методы многомерного анализа статистических данных : учеб. пособие. М. : Финансы и статистика, 2008. 396 с.
7. Браверман Э.М., Мучник И.Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. М. : Наука, 1983. 464 с.
8. Дорошенко Ю.А., Самотаев А.А. Теоретические и методологические основы анализа интегрированных экономических систем / ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия». Челябинск, 2011. 276 с.
9. Самотаев А.А., Дорошенко Ю.А. Структурный анализ экономических систем (теория и практика). Тюмень : Ист. Консалтинг, 2010. 298 с.
10. Макаров В.Л. Социальный кластеризм. Российский вызов. М. : Бизнес-Атлас, 2010. 272 с.
11. Гизатуллин Х.Н., Самотаев А.А., Дорошенко Ю.А. Математико-статистический анализ системы социально-экономических показателей развития Республики Башкортостан // Вестник ВЭГУ. 2011. № 4 (54). С. 8—22.

References

1. Gizatullin H.N., Rizvanov D.A. Problemy upravleniya slozhnymi sotsialno – ekonomicheskimi sistemami. [Problems of management of complex social-business systems] Ekaterinburg: Ekonomika, 2005. 218 s.
2. Katayeva Yu.V. [Building an effective system of interaction between actors of the regional housing: a hierarchical approach: All-Russian works. Symposium. of Economics. theory. T. II. Mezoekonomika, macroeconomics. Yekaterinburg, 2008, pp. 80-83.]
3. Krajzmer L.P. Kibernetika [Cybernetics] : Ucheb. posobie dlja s.-h. vuzov. M.: Agro-promizdat, 1985. 256 s.
4. Metodologicheskie aspekty ispolzovaniya faktornogo analiza v neiro-fiziologii [Methodological aspects of factor analysis use in neurophysiology] /P.V.Bundzen, A.S.Kaplunovskij, V.M.Klimenko, E.A.Korneeva// Metodologicheskie voprosy teoreticheskoy mediciny. L.: Medicina, 1975. S. 25-29.
5. Surmin Ju. P. Teorija sistem i sistemnyj analiz [Systems' theory and systematical analysis] : ucheb. posob. Kiev : MAUP, 2003. 368 s.
6. Simchera V.M. Metody mnogomernogo analiza statisticheskikh dannykh [Methods of multivariate analysis of statistical data] : Ucheb. Posobie. M.: Finansy i Statistika, 2008. 396 s.
7. Braverman Je. M., Muchnik I. B. Strukturnye metody obrabotki empiricheskikh dannykh. [Structural methods of empirical evidence processing].M. : Nauka, 1983. 464 s.
8. Doroshenko Ju.A., Samotaev A.A. Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy analiza integrirovannykh ekonomicheskikh sistem. Cheljabinsk [Theoretical and methodological fundamentals of integrated business systems' analysis] / FGBOU VPO «Cheljabinskaja gosudarstvennaja agroinzhenernaja akademija», 2011. 276 s.
9. Samotaev A.A., Doroshenko Ju.A. Strukturnyj analiz ekonomicheskikh sistem (teorija i praktika). [Structural analysis of business systems (theory and practice)] Tjumen: Ist. Konsalting, 2010. 298 s.
10. Makarov V.L. Sotsialnyj klasterizm. Rossijskij vyzov. [Social clustering. Russian challenge] . Biznes Atlas, 2010. 272 s.
11. Gizatullin H.N., Samotaev A.A., Doroshenko Ju.A. Matematiko-statisticheskij analiz sistemy sotsialno-ekonomicheskikh pokazatelej razvitija Respubliki Bashkortostan [Mathematical and statistical analysis of a system of social and economic development indexes of Bashkortostan]// Vestnik VJegu. 2011. № 4 (54). S. 8 – 22.

УДК 656.135

Рудольф Николаевич Ковалев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики транспорта и логистики Уральского государственного лесотехнического университета, Екатеринбург,
Сергей Андреевич Лаврищев, аспирант кафедры экономики транспорта и логистики Уральского государственного лесотехнического университета, Екатеринбург

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОСМОТРА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Rudolf N. Kovalev, DSc, professor; head of a chair 'Economics of transport and logistics' of the Ural State Forestry University, Ekaterinburg, Russia,
Sergey A. Lavrishchev, post-graduate student of a chair 'Economics of transport and logistics' of the Ural State Forestry University, Ekaterinburg, Russia

Oprimisation Of Technical Inspection Process Of Motor Transport Rolling Stock

Аннотация

Для рационализации поставлена задача моделирования процесса государственного технического осмотра с применением средств технической диагностики на пунктах технического осмотра. ПТО рассмотрен как система массового обслуживания (СМО) без потерь в виде одноканальной четырехфазной СМО с дисциплиной очереди «первый пришел — первый обслуживаешься». При наличии ограничений, данных в описании процесса обслуживания, численное представление работы ПТО с помощью известных аналитических методов представляется затруднительным. Поэтому поставлена задача исследовать систему ПТО для определения показателей его работы при различных вариантах производственных решений и возможной интенсивности поступления автомобилей на осмотр, которая решается моделированием на ЭВМ производственного процесса ГТО на основе метода статистических испытаний.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, подвижной состав, технический осмотр, моделирование, метод статистических испытаний.

Annotation

In order to optimize the process it is set the task of modeling the process of state technical inspection with use of technical diagnostics means at inspection stations. Inspection service is considered as a system of queuing system without losses in the form of single channel four-phase queuing system with a queue discipline 'the first to come is the first to be served'. Under constraints, given in the service process description, number notation of inspection stations' operation with use of known analytical methods is a problem. Therefore it is set the task to investigate the system of inspection stations to identify the functioning factors by different variants of production solutions and possible intensity of cars going through inspection, which is solved by modeling on PC the production process of state technical inspection based on method of statistical testing.

Key words: motor transport, rolling stock, technical inspection, modeling, method of statistical testing.

Управление техническим состоянием подвижного состава (ПС) осуществляется не только напрямую, посредством влияния на нормативные показатели, но и опосредованно, через проведение технических осмотров (ТО). Назначением ТО служит предотвращение эксплуатации ПС, по своему техническому состоянию не соответствующим требованиям безопасности, установленным нормативно-правовыми актами.

До 2001 г. все работы по организации и проведению государственного технического осмотра (ГТО) возлагались на территориальные подразделения ГИБДД. Постановление Правительства РФ № 880 [1] позволило привлекать юридических лиц и индивидуальных предпринимателей для организации пунктов технического осмотра (ПТО) транспортных средств, которые административно не подчиняются территориальным подразделениям ГИБДД или какой-то централизованной системе управления. В связи с этим возросло число предприятий, организаций и учреждений, привлекаемых к обеспечению государственного технического осмотра (рис. 1).

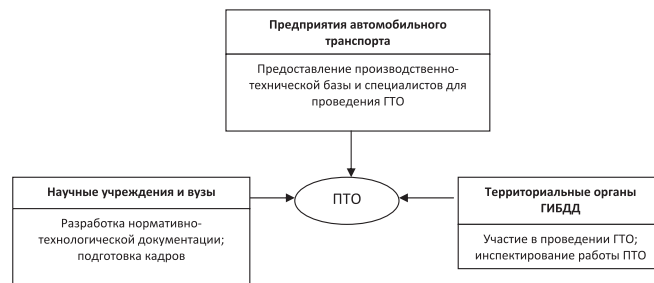


Рисунок 1 — Основные функции предприятий, организаций и учреждений, обеспечивающих проведение ГТО

Предприятия, осуществляющие ГТО, можно подразделить — по форме организации производства:
 а) на создаваемые юридическими лицами или индивидуальными предпринимателями — пункты технического осмотра;

б) создаваемые при территориальных подразделениях ГИБДД — станции государственного технического осмотра (СГТО);

— по типу проверяемых транспортных средств:

а) на грузовые автомобили, специальные и специализированные на их базе;

б) автобусы;

в) легковые автомобили;

г) мототранспорт;

д) прицепы и полуприцепы;

— по капитальности строительства производственной базы:

а) на стационарные;

б) передвижные;

— по способу организации технологического процесса:

а) поточные линии;

б) отдельные посты.

Рабочие посты ПТО и СГТО отличаются друг от друга характером размещенного на них оборудования и пропускной способностью.

Авторы статьи решают задачу моделирования процесса ГТО с применением средств технической диагностики на ПТО. Пункт технического осмотра представляет собой сложную систему, в которой транспортное средство последовательно проходит обслуживание в нескольких фазах. Под фазой понимается определенный этап производственного процесса ГТО. Операции, проводимые в каждой фазе, могут выполняться на одном или нескольких последовательных постах. Обобщенная схема работы ПТО приведена на рис. 2.



Рисунок 2 — Обобщенная схема работы ПТО

Процесс обслуживания технического средства выглядит следующим образом. Автомобиль прибывает на технический осмотр и проходит идентификацию (фаза 1). Работа данной фазы возможна с ограничением длины очереди или без ограничения. ТС, прошедшее первую фазу, направляется во вторую. Если в данный момент фаза занята, то автомобиль ждет ее освобождения, оставаясь в предыдущей фазе. Аналогично происходит перемещение ТС из второй в третью фазу и т. д. После прохождения технического осмотра ТС направляется в четвертую фазу для оформления результатов (очередь перед данной фазой не ограничена по длине).

На схему работы ПТО накладываются следующие ограничения. Обслуживание автомобилей происходит в порядке их поступления. Каждое поступившее на обслуживание ТС будет обслужено. Независимо от результата осмотра в предыдущей фазе, ТС направляется в последующую.

Таким образом, ПТО представляет собой систему массового обслуживания (СМО) без потерь, которую можно представить в виде одноканальной четырехфазной СМО с дисциплиной очереди «первый пришел — первый обслуживаешься» [2].

В работе [3] доказывается теорема, применимая к случаю, когда модель массового обслуживания является K -фазной, в которой для определенных условий поток требований, обслуженных каждым из K узлов, является пуассоновским и каждый узел можно рассматривать независимо. Это означает, что для i -го узла обслуживания вероятность P_{i1} того, что в системе находится i требований в стационарном режиме, определяется формулой

$$P_{mi} = (1 - p_i) \cdot p_i^{m_i}, \quad m_i = 0, 1, \dots, \quad (1)$$

где m_i — число требований, находящихся в системе, содержащей только i -й блок обслуживания.

Приведенный выше результат справедлив для стационарного процесса, когда

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \leq 1. \quad (2)$$

Однако в данном случае многофазную систему нельзя механически расчленять на самостоятельные СМО и изучать их по отдельности, так как в системе ПТО сильна взаимосвязь отдельных фаз. Например, при загруженности $(i+1)$ -й фазы i -я фаза может прекратить обслуживание, пока не будет ликвидирована перегруженность $(i+1)$ -й фазы.

В системе входящий поток для первой фазы имеет интенсивность λ_1 , а для второй фазы интенсивность входящего потока $\lambda_2 = \mu_1$ (μ — интенсивность обслуживания в первой фазе), т. е. все случайные события, оказывающие влияние на интенсивность обслуживания в первой фазе, влияют на входящий поток с первой на вторую фазу. Аналогично для третьей фазы $\lambda_3 = \mu_2$, для четвертой фазы $\lambda_4 = \mu_3$.

Основываясь на работе аналогичных систем, предполагая, что поступление требований в систему подчинено пуассоновскому распределению. Вероятность $P_{M(t)}$ поступления требований в момент времени t равна

$$P_{M(t)} = \frac{\lambda \cdot t^m}{m!} \cdot e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где λ — интенсивность потока ТС за интервал времени t ;
 t — число автомобилей.

При этом интенсивность обслуживания требований в фазах соответствует экспоненциальному закону, плотность вероятности которого равна

$$f(t) = \mu \cdot e^{-\mu t}. \quad (4)$$

При наличии ограничений, данных в описании процесса обслуживания, численное представление работы ПТО с помощью известных аналитических методов представляется затруднительным. Поэтому ставится задача исследовать систему ПТО для определения показателей работы при различных вариантах производственных решений и возможной интенсивности поступления автомобилей на осмотр, что решается моделированием на ЭВМ производственного процесса ГТО с использованием метода статистических испытаний.

Сущность статистического моделирования состоит в построении для исследуемого процесса алгоритма, имитирующего поведение элементов сложной системы и взаимодействия между ними с учетом случайных факторов. К достоинствам данного метода моделирования можно отнести возможность описания сложных систем на высоком уровне детализации, отсутствие ограничений зависимостей между параметрами модели и состоянием внешней среды, возможность исследования изменения динамики системы.

Недостатком имитационного моделирования является невозможность отразить реальное состояние системы. Как заметил Р. Менон, «имитационная модель в принципе не точна и мы не в состоянии измерить степень этой точности» [4].

В отличие от физического моделирования имитационное моделирование полностью осуществляется на ЭВМ. При этом для описания взаимодействия составных частей может использоваться универсальный язык программирования (Fortran, Pascal, Basic и др.) или специализированные языки имитационного моделирования (ДИНАМО, GPSS, СИМУЛА и др.).

Математическая модель организации работы ПТО выглядит следующим образом.

Суммарное время, затраченное пунктом технического осмотра на обслуживание одного автомобиля, определяется как

$$T_{\text{ПТО}} = \sum_{i=1}^n T_i^{\text{об}} + \sum_{i=1}^n T_i^{\text{п}}, \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^n T_i^{\text{об}}$ — суммарное время обслуживания одного автомобиля;

$\sum_{i=1}^n T_i^{\text{п}}$ — суммарное время простоя оборудования;

n — количество фаз на линии.

Распишем по составляющим суммарное время обслуживания:

$$\sum_{i=1}^n T_i^{\text{об}} = T_{\text{об}}^{\text{I}} + T_{\text{об}}^{\text{II}} + \dots + T_{\text{об}}^{\text{I}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{об}}^{\text{I}}$ — время обслуживания автомобиля на n -й фазе;

n — количество фаз;

$$T_{\text{об}}^{\text{I}} = f_n(t_n), \quad (7)$$

где t_n — время, затраченное на выполнение каждой операции в n -й фазе.

Таким образом, (2) можно записать в следующем виде:

$$\sum T_{\text{об}} = f_1(t_1) + f_2(t_2) + \dots + f_n(t_n) = \sum_{i=1}^n f_i(t_i). \quad (8)$$

Время простоя фазы в ожидании автомобиля (время простоя обслуживающих аппаратов) определяется как

$$\sum_{i=1}^n T_{\text{п}} = T_{\text{п}}^{\text{I}} + T_{\text{п}}^{\text{II}} + \dots + T_{\text{п}}^{\text{I}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{п}}^{\text{I}}$ — время простоя i -х фаз.

Время простоя оборудования на первой фазе зависит от изменения интенсивности входящего потока λ_1 , а на остальных — от интенсивности обслуживания на предыдущей фазе μ .

Время простоя оборудования:

— на 1-й фазе $T_{\text{п}}^{\text{I}} = \phi_1(\lambda_1); \quad (10)$

— на 2-й фазе: $T_{\text{п}}^{\text{II}} = \phi_2(\lambda_1, \mu_1). \quad (11)$

Но $\lambda_2 = \mu_1, \lambda_3 = \mu_2, \dots, \lambda_n = \mu_{n-1}$. Тогда время простоя оборудования на n -й фазе

$$T_{\text{п}}^{\text{I}} = \phi_n(\lambda_1, \dots, \lambda_n). \quad (12)$$

Суммарное время простоя оборудования пункта (4) можно записать

$$\sum T_{\text{п}} = \phi_1(\lambda_1) + \phi_2(\lambda_1, \mu_1) + \dots + \phi_n(\lambda_1, \dots, \lambda_n) = \sum_{i=1}^n \phi_i(\lambda_1, \dots, \lambda_n). \quad (13)$$

Используя (3) и (5), время пребывания автомобиля в системе (1), можно записать как

$$T_{\text{ПТО}} = \sum_{i=1}^n f_i(t_i) + \sum_{i=1}^n \phi_i(\lambda_i). \quad (14)$$

С изменением интенсивности входящего потока λ_1 и интенсивности обслуживания μ_1 изменится и время пребывания автомобиля в системе.

Так как выходящий поток обслуживаемых автомобилей с интенсивностью μ_i из каждой предыдущей фазы является одновременно входящим потоком, то λ_i для каждой последующей фазы и время пребывания на ней будут соответственно

$$T_n = \phi_n[\lambda_n; f_n(t_n)], \quad (15)$$

где

$$\lambda_n = F[\lambda_{n-1}; f_{n-1}(t_{n-1})]. \quad (16)$$

Тогда время пребывания в системе

$$T_{\text{ПТО}} = \phi_1[\lambda_1; f_1(t_1)] + \phi_2[\lambda_2; f_2(t_2)] + \dots + \phi_n[\lambda_n; f_n(t_n)] = \sum_{i=1}^n \phi_i[\lambda_i; f_i(t_i)]. \quad (17)$$

На основании вышеизложенной математической модели разработан алгоритм и программное обеспечение для моделирования организации работы ПТО.

Литература

1. «О порядке проведения государственного технического осмотра транспортных средств, зарегистрированных в Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации»: Постановление Правительства РФ № 880 от 31.07.98 // Государственный технический осмотр в нормативных правовых актах: Требования к организации работ по проверке технического состояния транспортных средств. М.: Н. Новгород, 2001. Вып. 1. С. 26—28.
2. Таха Х. Введение в исследование операций: пер. с англ. М.: Мир, 1985. Кн. 2. 496 с.
3. Мозгалеvский А.В., Тарасенко В.И., Костанди Г.Г. Автоматизация процессов диагностирования при технической эксплуатации автомобилей. Хабаровск: ХАПИ, 1982. 191 с.
4. Менон Р. Имитационное моделирование систем. Искусство и наука. М.: Мир, 1978. 417 с.

References

1. O porjadke provedenija gosudarstvennogo tekhnicheskogo osmotra transportnykh sredstv, zaregistrirannykh v Gosudarstvennoj inspekcii bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija Ministerstva vnutrennikh del Rossijskoj Federatsii [About state technical inspection of vehicles, registered in State inspection of traffic safety of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation]: Postanovlenie Pravitelstva RF ot 31 ijulja 1998g. №880 // Gosudarstvennyj tekhnicheskij osmotr v normativnykh pravovykh aktakh: Trebovaniya k organizatsii rabot po proverke tekhnicheskogo sostojanija transportnykh sredstv. — M. N.Novgorod. 2001. Vyp. 1. S. 26—28.
2. Takha H. Vvedenie v issledovanie operatsij [Introduction into operations' research]: Per. s angl. M.: Mir, 1985. Kn.2. 496 s.
3. Mozgalevskij A.V., Tarasenko V.I., Kostandi G.G. Avtomatizatsija protsessov diagnostirovanija pri tekhnicheskoy ekspluatatsii avtomobilej. [Automation of diagnostics processes by cars' technical exploitation] Khabarovsk: HAPI, 1982. 191 s.
4. Menon R. Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Iskustvo i nauka [Simulation modeling of systems. Art and science] / R. Menon. M.: Mir, 1978. 417 s.

УДК 656.222.2:656:222.4.021.8

Сергей Алексеевич Плахотич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОПУСКА ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ РАЗЛИЧНОЙ КАТЕГОРИИ ПО МАССЕ И ДЛИНЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДУЗЛОВЫХ СТАНЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Sergey A. Plakhotich, PhD, associate professor, head of «Stations, Junctions and Freight Work» Department, The Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Handling Of Freight Trains Of Different Masses And Lengths On The Basis Of Prehub Modification Stations' Use

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы организации обращения поездов повышенной массы и длины, соединенных, тяжеловесных и длинносоставных на грузонапряженных железнодорожных направлениях с сохранением обращения параллельно грузовых поездов нормативной массы и длины (сборных, участковых, вывозных) и пассажирских. Особое внимание уделено организации обращения грузовых блок-поездов как разновидности поездов повышенной массы и длины, представляющих собой систему из двух (трех) грузовых поездов каждый со своим поездным локомотивом, т. е. систему многих единиц поездов.

Для реализации технологии пропуска блок-поездов предлагается перед железнодорожными узлами или сортировочными станциями, где производится смена локомотива, технический и коммерческий осмотр, создать станции преобразования (расцепки и сцепки) блок-поездов. При этом создание таких станций основывается на реконструкции существующего путевого развития для удлинения путей до двойной длины. Приводятся 6 вариантов путевого развития предузловых станций преобразования, которые сравниваются по различным признакам, в том числе по признаку ввода в узел и вывода из узла составов блок-поездов (поездной — когда работают только поездные локомотивы, вывозной — здесь участвует маневровый узловой локомотив).

В статье содержатся математические выкладки расчета времени на формирование и расформирование, общее время занятия удлиненных путей станций преобразования блок-поездами, средняя длина удлиненных путей этих станций. Приведены варианты поездного положения на станции преобразования при обращении блок-поездов.

Выведена зависимость степени использования одного удлиненного пути станции преобразования от доли блок-поездов в общем поездопотоке в одном направлении движения. Рассчитана пропускная способность удлиненного пути станции преобразования.

Ключевые слова: блок-поезд, грузовой, двойной, железнодорожный, одинарный, перевозочный, поездопоток, предузловая, преобразование, приемоотправочный процесс, расформирование, станция, транспорт, тяжеловесный, удлиненный, формирование.

Annotation

The organization problems of trains' handling of excess mass and length, coupled, heavy freight and long trains in heavy-traffic lines saving parallel handling of freight trains of standard mass and length (pickup, local, export) and passenger ones are described. Organization of freight block trains' handling as a kind of trains of extended mass and length, i.e. two(three) freight trains each with its locomotive, the system of many trains is showed.

For block-trains' handling it is offered to create modification stations (uncoupling and coupling) of block train before railway hubs or marshalling yards where locomotives are changed and technical and commercial checkup is made. The organization of such stations is based on renewal of the existing track gridiron for rail extension to double length. There are given 6 variants of track gridiron of prehub modification stations and they are compared by different factors including input-output hub principle of block trains (train type when the main locomotive drives and removal type when shunting locomotive drives).

The computations of timing for make up and brake up, total time of extended tracks of modification stations' occupation by block trains and the average length of extended tracks of these stations are described in the article. There are given variants of trains' locations at modification station during block trains' handling.

Dependence of one extended track use on amount of block trains in total traffic flow in one direction is stated. Capacity of extended track of modification station is calculated.

Key words: block train, freight, double, railway, single, transportation, train flow, prehub, modification, receiving-departure, process, braking-up, station, transport, heavy freight, extended, make up.

Комплекс технико-технологических параметров железнодорожных направлений для обеспечения стабильного пропуска грузовых поездов различных весовых категорий является актуальной научной проблемой по повышению эффективности поездной работы. В качестве технического обеспечения линии предполагается наличие на станциях удлинённых приемоотправочных путей и использование электровозов по системе многих единиц (СМЕ). Разработка технологии работы связана с организацией формирования и пропуска блок-поездов. Под блок-поездом понимается поездное формирование, состоящее из двух (трех) соединённых составов нормативной (графиковой) массы и длины, и поездных локомотивов в голове каждого состава либо только в голове, т. е. блок-поезд — это система многих единиц поездов (СМЕП) [1, 2].

Совместный пропуск на железнодорожных линиях поездов повышенной и стандартной массы и длины требует удлинения приемоотправочных путей на промежуточных (для обгона) и технических (для производства осмотров составов и смены локомотивов и бригад) станциях. Необходимое число удлинённых путей на этих станциях определяется скоростями и размерами движения поездов. Количество станций с удлинёнными приемоотправочными путями будет зависеть от технологии совместного пропуска поездов различной весовой категории. Для организации обращения блок-поездов необходимо иметь удлинённые станционные пути, на которых будет производиться преобразование блок-поездов. Целесообразнее для этой цели использовать предузловые станции, что исключает реконструкцию путевого развития сортировочной станции, для которой потребовалось бы значительно больше капитальных вложений, и усиление напряжённости ее работы.

Таким образом, на направлении, на котором требуется пропускать поезда различной весовой категории, необходимо иметь удлинённые приемоотправочные пути на технических, обгонных промежуточных и предузловых станциях преобразования блок-поездов. Расчет удлинения станционных путей и их количество на технических станциях и обгонных пунктах подробно рассмотрен в научных исследованиях [1—4 и др.], поэтому рассмотрим лишь расчет пропускной способности удлинённых приемоотправочных путей на технической станции. Так как процесс преобразования предполагается организовать на предузловых станциях, то основное внимание будет уделено расчету числа удлинённых путей на предузловых станциях преобразования, зависящего от технологических вариантов организации пропуска блок-поездов совместно с остальным поездопотоком на железнодорожном направлении.

Рассмотрим вопрос технического обеспечения технического и коммерческого осмотров, а также смены локомотивов и бригад одиночных тяжеловесных поездов на технических станциях. Очевидно, что число стоянок на таких станциях будет определяться дальностью следования тяжеловесных поездов или технологическим вариантом их пропуска на направлении. Технический осмотр груженых поездов с вагонами на подшипниках скольжения производится через каждые 200 км пробега, а с вагонами на роликовых подшипниках — 400 км. Естественно, что более качествен-

ный технический и коммерческий осмотр гарантирует безотказное проследование поездов на более дальние расстояния.

Статистический анализ путевого развития технических станций на грузонапряженных направлениях показал, что, как правило, на технической станции имеется один приемоотправочный путь, способный вместить по длине одиночный тяжеловесный поезд (1050—1250 м). Простой тяжеловесного поезда по неприему станцией не должен оказывать влияния на режим движения последующих поездов. Среднесуточные размеры движения грузовых и пассажирских поездов на грузонапряженных двухпутных участках между техническими станциями составляют 110—120 пар. Средний интервал между поездами не превышает 13 мин. Следовательно, простой тяжеловесного одиночного поезда по неприему технической станции не должен превышать 13 мин.

Среднее время ожидания приема тяжеловесного поезда на станцию [4]

$$t_{ож}^{пр} = \frac{\psi_{п} (v_{вх}^2 + v_{зан}^2)}{2\mu_{п}(1-\psi_{п})}, \text{ ч}, \quad (1)$$

где $\psi_{п}$ — коэффициент загрузки приемоотправочного пути; $\mu_{п}$ — интенсивность обслуживания потока тяжеловесных поездов;

$v_{вх}$ — коэффициент вариации интервалов прибытия тяжеловесных поездов;

$v_{зан}$ — коэффициент вариации времени занятия приемоотправочного пути.

В свою очередь, загрузка одного станционного пути составляет

$$\psi_{п} = \frac{\lambda}{\mu_{п}} = \frac{N_{гр} (P_{т} + P_{т}^{yc} + \phi_{п} P_{п}) \cdot 60 \cdot m \cdot \tau}{1440 \cdot x \cdot y}, \quad (2)$$

где λ — интенсивность входящего потока тяжеловесных поездов,

$$\lambda = \frac{\sum_{печ} N_{гр} (P_{т} + P_{т}^{yc} + \phi_{п} P_{п})}{24}, \quad (3)$$

$N_{гр}$ — число одиночных транзитных грузовых поездов в исходном потоке по направлениям движения;

$P_{т} \left(P_{т}^{yc} \right)$ и $P_{п}$ — соответственно доля одиночных тяжеловес-

ных и потенциальных к преобразованию в тяжеловесные поездов в общем потоке по направлениям движения;

m — средний состав одиночного тяжеловесного поезда, ваг.;

x — число групп в бригаде ПТО;

y — число бригад ПТО.

Интенсивность обслуживания потока тяжеловесных поездов — величина, обратная времени занятия приемоотправочного пути $t_{зан}$

$$t_{зан} = t_{пр} + t_{от} + t_{обр} + t_{от}^{от}, \text{ ч}, \quad (4)$$

где $t_{пр}$, $t_{от}$ — время занятия пути маршрутами приема и отправления, обычно принимается равным 0,16 ч;

$t_{обр}$ — средняя продолжительность обработки состава (технический осмотр и безотцепочный ремонт вагонов);

$t_{ож}^{от}$ — простой состава в ожидании отправления, можно принять равным половине среднего интервала между нитками графика движения, т. е. примерно 6—7 мин.

Средняя продолжительность обработки одного тяжеловесного состава определяется как [5]

$$t_{обр} = (1 - \alpha_{б,р}) \frac{\tau \cdot m}{x} + \alpha_{б,р} \left(t_{рем} + \frac{\tau \cdot m}{2x} \right), \text{ ч}, \quad (5)$$

где $\alpha_{б,р}$ — доля тяжеловесных составов, требующих безотцепочного ремонта вагонов, $\alpha_{б,р} = 0,7$;

$t_{рем}$ — среднее время безотцепочного ремонта вагонов, 0,4 ч;

τ — средняя продолжительность технического осмотра одного вагона, 0,016 ч.

При указанных значениях параметров среднее время обработки одного тяжеловесного поезда будет равно 0,63 ч, а время занятия приемоотправочного пути — 0,9 ч. Принимая коэффициент вариации входящего потока тяжеловесных поездов $v_{вх} = 0,85$ и коэффициент вариации времени занятия приемоотправочного пути $v_{зан} = 0,2$, можно получить зависимость среднего времени ожидания приема одинарного тяжеловесного поезда на техническую станцию от числа этих поездов. Эта зависимость показана на рис. 1 при двух- и трехгрупповом осмотрах тяжеловесных поездов. Выполненные расчеты позволяют сделать вывод: при двухгрупповом осмотре тяжеловесных одинарных поездов техническая станция может в сутки пропустить по одному приемоотправочному пути всего 10 поездов длиной 1050 м, при трехгрупповом осмотре — 14. При больших размерах движения тяжеловесных поездов и случайном характере подхода этих поездов к технической станции задержки по неприему будут оказывать существенное влияние на режим пропуска поездопотока через техническую станцию, резко снижая пропускную способность прилегающих участков.

Одним из важных элементов в системе организации движения блок-поездов (двойных или тройных по массе и длине) являются станции преобразования одинарного поездопотока в поток блок-поездов в комплексе с прилегающим железнодорожным узлом. Наличие станций преобразования исключает существенные изменения конструкций и технологии работы сортировочных или участковых станций в узле, так как последние являются настолько загруженными поездной и маневровой работой на современном этапе, что введение новых функций в работу таких станций может привести к дополнительным осложнениям.

Эффективнее всего в качестве пунктов преобразования поездопотоков использовать предузловые станции, расположенные на подходах к узловым сортировочным или участковым станциям, причем эти предузловые станции должны находиться внутри тех участков, на которых вводится в обращение преобразованный поездопоток. При выборе предузловой станции в качестве станции преобразования необходимо учитывать удаленность этой станции от узла (или сортировочной станции) и существующие конструкции и длину приемоотправочных путей. Расстояние от сортировочной станции (узла) до предузловой в 126 узлах 14 дорог варьируется в пределах от 1,5 до 32 км. Отсутствие на подходах к узлу близкорасположенной промежуточной станции (например, расстояние до ближайшей промежуточной стан-

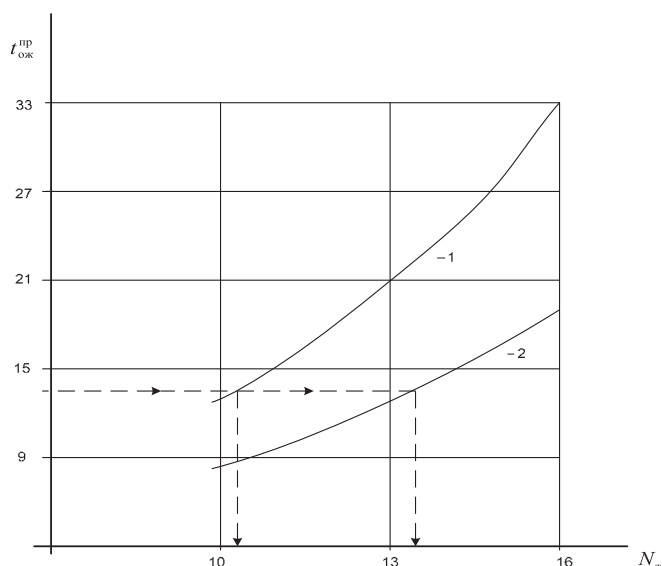


Рисунок 1 — Зависимость времени простоя одинарного тяжеловесного поезда по неприему от размеров движения: 1 — двухгрупповой осмотр; 2 — трехгрупповой

ции от узла составляет более 30 км) требует сооружения новой промежуточной станции, которая служила бы составляющим элементом в системе преобразования. При этом место сооружения такой станции преобразования должно быть удалено от основной сортировочной или участковой станции так, чтобы по новому перегону обеспечивалось проследование грузовых поездов без снижения скоростей движения и дополнительных задержек. Расстояние между узлом и станцией преобразования ($L_{сп}$) на двухпутных линиях можно определить следующим образом:

максимальное

$$L_{сп}^{max} = \frac{1440 - T_{тех}}{\gamma(N_{гр} + N_{пс} + N_{сб})} - (t_m + 0,1 + t_o + t_n) V_{гр} - 0,001 L_p \left(\frac{\Delta}{1 - \Delta} \right), \text{ км}, \quad (6)$$

минимальное

$$L_{сп}^{min} = \frac{I_p - \tau_{ин}}{(1 - \Delta) \cdot 60} V_{гр} = \frac{I_p - (t_m + 0,1 + t_o + t_n)}{(1 - \Delta) \cdot 60} V_{гр} - 0,001 L_p \left(\frac{\Delta}{1 - \Delta} \right), \text{ км}, \quad (7)$$

где $N_{гр}$, $N_{пс}$, $N_{сб}$ — соответственно число грузовых, пассажирских и сборных поездов, отправляемых за сутки узловой станцией на данный участок;

γ — коэффициент, учитывающий нестабильность размеров движения поездов в течение суток;

$\tau_{ин}$ — интервал неодновременного попутного прибытия пассажирского поезда, мин [6];

t_m — время, необходимое для подготовки маршрута приема пассажирского поезда, мин;

L_p — расстояние, проходимое пассажирским поездом и определяемое из схемы взаимного расположения поездов, км [6];

t_o — время возможного опоздания грузового поезда на перегоне, 1—1,5 мин;

t_n — возможное время проследования пассажирского поезда по перегону, 0,921—2 мин;

$V_{гр}$ — скорость движения грузового поезда, км/ч;

$T_{тех}$ — технологически необходимое время для производства ремонтно-восстановительных работ, мин;

Δ — отношение скоростей движения грузового и пассажирского поездов;

I_p — интервал движения между поездами при автоблокировке, мин.

Длина приемоотправочных путей на станции преобразования должна соответствовать длине блок-поезда. Средняя длина путей на станции преобразования может быть рассчитана как

$$\bar{\ell}_{\text{уд. поп}} = \left\{ \sum_{j=\ell_{\min}}^{j=\ell_{\max}} P_{2j} \cdot \left[\left(\ell_j + \frac{\Delta \ell}{2} \right) + \ell_{\text{лок}j} \right] \right\} + a, \text{ м}, \quad (8)$$

где P_{2j} — частота распределения двойных поездов по длине в j -м диапазоне;

ℓ_j — длина j -го двойного поезда в распределении, м;

$\ell_{\text{лок}j}$ — длина локомотива в j -м блок-поезде, м;

$\Delta \ell$ — интервал в распределении поездов по длине, м;

a — установочное расстояние, м,

но не менее

$$\ell_{\text{уд. поп}} = 2\ell_{\text{поезд}}^{\max} + \ell_{\text{лок}} + a, \text{ м}. \quad (9)$$

Наиболее вероятная длина приемоотправочного пути на станции преобразования равна двум принятым по СНиП стандартам (850 м), т. е. 1700 м. Расчету длины станционных путей под двойные поезда (блок-поезда) посвящена работа [5], а расчет необходимого числа таких путей приведен в [1, 3, 7 и др.].

Назначение станций преобразования заключается в выполнении следующих операций:

- прием и отправление блок-поездов с различной схемой формирования (ЛСС, ЛЛСС и др.);
- смена локомотивных бригад (если блок-поезда не подлежат расформированию и следуют дальше транзитом без отцепки локомотива);
- соединение и разъединение составов при использовании различных схем блок-поездов и организации подвода и вывода одинарных составов при их преобразовании (вывозной или поездной режимы работы), обеспечивая безопасность производства всех технологических операций и движения поездов в целом;
- беспрепятственный пропуск поездов по главным путям;
- обгон блок-поездов и одинарных грузовых поездов пассажирскими.

Этим требованиям с учетом необходимых технологических операций должны отвечать схемы станций преобразования и обгона. Важным условием бесперебойной работы станций является возможность приема одинарных поездов в головную или в хвостовую часть удлиненного пути. На рис. 2 представлено несколько конструкций станций преобразования в зависимости от схемы формирования блок-поезда. На станциях



Рисунок 2 — Станции преобразования поездотока для различных схем формирования блок-поездов

(см. рис. 2г, д, ж) пути 5 и 6 предназначены для выполнения маневровых рейсов поездных локомотивов: при формировании блок-поезда — проследование локомотива второго поезда в голову первого и последующее их объединение в одну тяговую систему; при расформировании — проследование локомотива в голову второго состава после разъединения тяговой системы. Тупики 5, 6, 7, 8 (см. рис. 2в, г, д, ж) необходимы для предотвращения случайного попадания составов на главные пути, а также для отстоя локомотивов в ожидании прицепки к составам.

Технология работы станций преобразования предусматривает два режима работы локомотивов и бригад: поездной ивывозной. В зависимости схемы формирования и типа локомотива по секционности в блок-поезде выбирается технология процессов преобразования. При поездном режиме работы каждый одинарный поезд поступает на станцию преобразования со своим поездным локомотивом, после чего производится объединение локомотивов в одну тяговую систему (при схеме ЛЛСС, где Л — локомотив нор-

мативной комплектации для одинарного нормативного — графического по массе и длине — состава, С — одинарный нормативный — графический по массе и длине — состав). Рассмотрены варианты очередности поступления сначала «тяжелого» и «легкого» (вариант 1), затем «легкого» и «тяжелого» (вариант 2) по массе одинарных составов на станцию.

Среднюю величину простоя в ожидании формирования в расчете на один объединяемый поезд можно определить через средний интервал прибытия одинарных поездов на станцию преобразования при условии, что суммарная масса блок-поезда требует использования спаренных двухсекционных локомотивов (ЛЛСС),

$$I_{Л4} = \frac{(n_c - 1) \cdot (1440 - T_{\text{тех}})}{n_c \cdot P_{\text{бп(Л4)}} \cdot (1 - P_{\text{т}} - P_{\text{т}}^{\text{yc}} - P_{\text{п}} - P_{\text{н}}) \cdot N_{\text{гр}} \cdot L_{\text{сп}} \cdot (1 - P_{\text{отк}})}, \text{ мин.} \quad (10)$$

Тогда время ожидания составит:

(вариант 1)

$$t_{\text{ож}} \approx I_{Л4} + 5,1 - t_{\text{пр1}}, \text{ мин};$$

(вариант 2)

$$t_{\text{ож}} \approx I_{Л4} + 4,1 - t_{\text{пр1}}, \text{ мин},$$

где $T_{\text{тех}}$ — время, выделяемое для проведения технологических «окон», мин;

$t_{\text{пр1}}$ — время, необходимое для проследования первого поезда на определенный станционный путь и его установки, мин;

$L_{\text{сп}}$ — длина перегона между узлом и станцией преобразования, км;

$P_{\text{отк}}$ — вероятность отказа по техническим причинам на один поезд и 1 км пути, $6,446 \cdot 10^{-6}$ [1, с. 100];

n_c — число составов в одном блок-поезде.

Средняя продолжительность технологических операций по формированию блок-поездов со схемой ЛЛСС в поездном режиме работы на станции преобразования с учетом простоя в ожидании прибытия второго состава равна

$$t_{\text{ф}} = 40 - I_{\text{р}} + I_{Л4}, \text{ мин.} \quad (11)$$

В процессе расформирования блок-поезда со схемой ЛЛСС в поездном режиме на одинарные составы существует задержка готовых к отправлению одинарных поездов и блок-поездов на участок, которая на один состав блок-поезда составит

$$t_{\text{от}}^{\text{ож}} = \frac{N_{\text{пс}} [(1 - \Delta) t_{\text{гр}} + \tau_{\text{нп}}] + N_{\text{гр}}^{\text{од}} \cdot I_{\text{р}} \times}{N_{\text{бп}}} \times \frac{I_{\text{р}} (N_{\text{гр}}^{\text{од}} + \varepsilon_{\text{пс}} N_{\text{пс}})}{1440 - T_{\text{тех}} - I_{\text{бп}} \cdot N_{\text{бп}}} + I_{\text{р}} - t_{\text{рф}}', \text{ мин}, \quad (12)$$

где $N_{\text{пс}}$ — размеры движения пассажирских поездов;

$t_{\text{гр}}$ — время хода грузового поезда на перегоне в сторону узла, мин;

$N_{\text{гр}}^{\text{од}}$ — размеры движения одинарных (не участвующих в преобразовании) грузовых поездов;

$N_{\text{бп}}$ — размеры движения блок-поездов, поступающих на расформирование на станцию преобразования;

$I_{\text{бп}}$ — интервал движения между блок-поездами, мин;

$t_{\text{рф}}$ — средняя продолжительность технологических операций для каждого из двух составов расформируемого блок-поезда, 23,1 мин.

Если выражение (12) имеет отрицательное значение, то время простоя в ожидании можно не учитывать.

При вывозном режиме работы в системе «узел — станция преобразования» в обращение вводятся вывозные локомотивы. Средний простой в ожидании формирования блок-поездов со схемой ЛСС на станции преобразования при обращении вывозных локомотивов определяется аналогично (10)

$$I_{Л2,Л3} = \frac{(n_c - 1) (1440 - T_{\text{тех}})}{n_c (P_{\text{бп(Л2)}} + P_{\text{бп(Л3)}}) (1 - P_{\text{т}} - P_{\text{т}}^{\text{yc}} - P_{\text{п}} - P_{\text{н}}) N_{\text{гр}} L_{\text{сп}} (1 - P_{\text{отк}})}, \text{ мин.} \quad (13)$$

Тогда время ожидания прибытия второго поезда составит:

(вариант 1)

$$t_{\text{ож}} \approx I_{Л2,Л3} + 5,1 - t_{\text{пр1}}, \text{ мин};$$

(вариант 2)

$$t_{\text{ож}} \approx I_{Л2,Л3} + 4,1 - t_{\text{пр1}}, \text{ мин}.$$

Задержки готовых к отправлению составов после расформирования блок-поездов будут аналогичными, как и в ранее рассмотренном случае [см. (12)]. Средняя продолжительность технологических операций для каждого из двух составов расформируемого блок-поезда в случае а) равна $t'_{\text{рф}} = 16,5$ мин, б) $t'_{\text{рф}} = 20,6$ мин [1, с. 105].

Анализ технологических графиков выполнения преобразования показал, что наиболее приемлемым случаем является вариант с вывозным режимом, т. е. когда обращаются вывозные локомотивы. На рис. 3а и 3б показаны варианты поездного положения на станции преобразования в зависимости от схемы блок-поезда и очередности поступления одинарных составов. Время занятия удлиненного пути одним блок-поездом под операциями формирования и расформирования, с учетом (10)—(13) и технологических графиков [1, с. 99—105], составит соответственно:

$$t_{\text{эл(Лк)}}^{\text{ф}} = t_{\text{эл(Лк)}}^{\text{р}} + \frac{(n_c - 1) (1440 - T_{\text{тех}})}{n_c \cdot P_{\text{бп(Лк)}} \cdot (1 - P_{\text{т}} - P_{\text{т}}^{\text{yc}} - P_{\text{п}} - P_{\text{н}}) N_{\text{гр}} L_{\text{сп}} (1 - P_{\text{отк}})} + I_{\text{р}}, \text{ мин}; \quad (14)$$

при расформировании

$$t_{\text{эл(Лк)}}^{\text{р}} = t_{\text{рф(Лк)}}' + \left\{ \frac{N_{\text{пс}} [(1 - \Delta) t_{\text{гр}} + \tau_{\text{нп}}] + N_{\text{гр}}^{\text{од}} I_{\text{р}} \times \left(\frac{N_{\text{гр}}^{\text{од}} + \varepsilon_{\text{пс}} N_{\text{пс}}}{1440 - T_{\text{тех}} - I_{\text{бп}} N_{\text{бп}}} \right) + I_{\text{р}}}{N_{\text{бп}}} \right\} - t_{\text{рф}}', \text{ мин}, \quad (15)$$

где $t_{\text{эл(Лк)}}^{\text{р}}$ — «чистое» время, необходимое на операции по соединению составов, подцепки локомотивов, опробованию тормозов и отправлению блок-поезда на перегон, при схеме

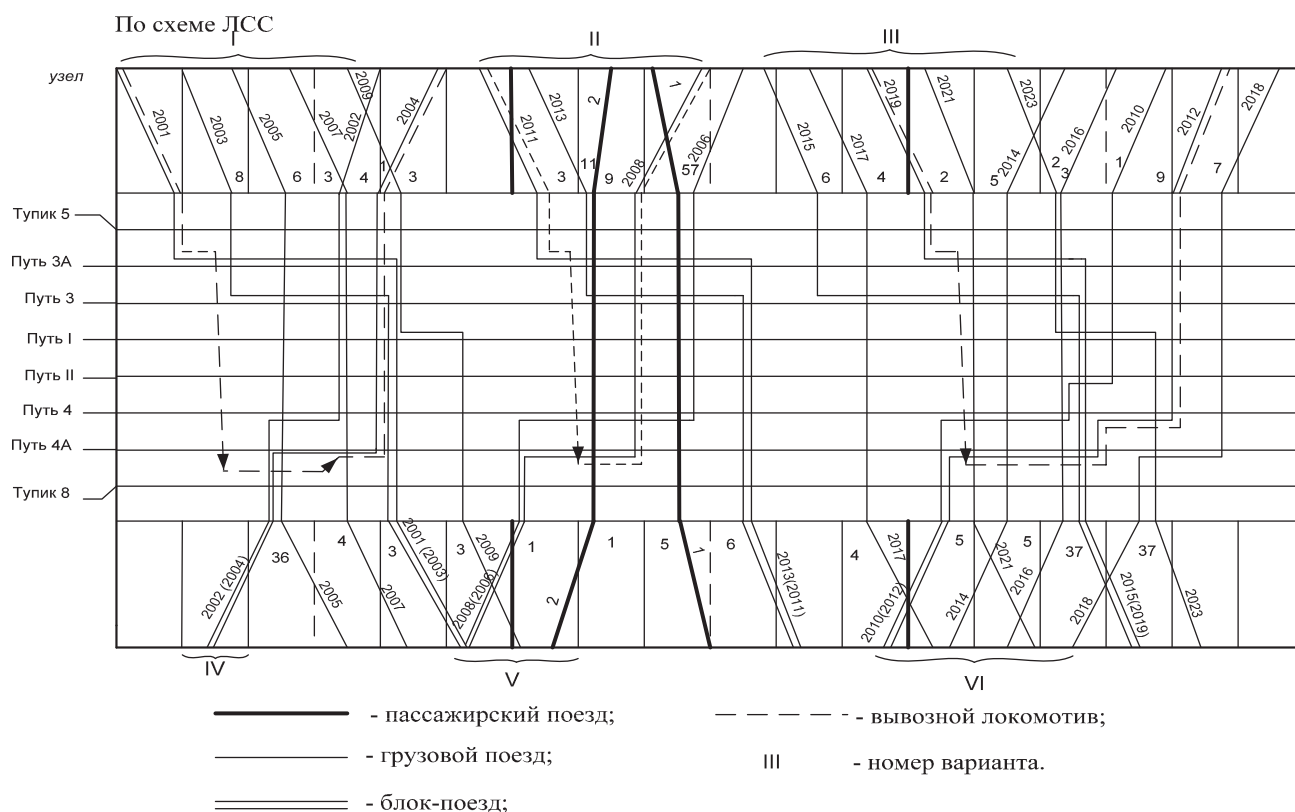


Рисунок 3а — Варианты поездного положения на станции преобразования

ЛЛСС — 32,1 мин [1, с. 99—101], при схеме ЛСС — 24,1 мин [1, с. 103—104];

$t_{\text{рф(Лк)}}$ — общая продолжительность операций по расформированию блок-поезда, при схеме ЛЛСС — 34,6 мин [1, с. 102], при схеме ЛСС — 32,1 мин [1, с. 105];

Лк — число секций локомотивов в одной тяговой позиции.

Если величина, заключенная в фигурных скобках (15), становится отрицательной, то ее принимают равной нулю. Общее время занятия удлинённых путей станции преобразования будет представлять сумму продолжительности операций по формированию (расформированию) всех блок-поездов с соответствующими схемами (ЛЛСС, ЛСС), поступающих на данную станцию за сутки:

$$T_3^{\Phi} = \sum_{n_c=2}^{n_c=n_{\text{доп}}} \sum_{L_k=2}^{L_k=K} N_{\text{бп(Лк)}} \cdot t_{\text{з(Лк)}}^{\Phi};$$

$$T_3^{\text{P}} = \sum_{n_c=2}^{n_c=n_{\text{доп}}} \sum_{L_k=2}^{L_k=K} N_{\text{бп(Лк)}} \cdot t_{\text{з(Лк)}}^{\text{P}}, \text{ мин.} \quad (16)$$

Приближенное значение числа удлинённых путей по направлениям движения (технологическим операциям) можно получить из следующего выражения:

$$m_{\text{уд.п}} = \frac{T_3}{1440 - T_{\text{тех}}}, \text{ путей.} \quad (17)$$

Пропускная способность удлинённого пути станции преобразования составит

$$N_{\text{уд.п.}} = \frac{1440 - T_{\text{тех}}}{t_3^{\text{cp}}} = \frac{N_{\text{бп}}}{\alpha_{\text{исп}}^{\text{уд.п.}}}, \text{ поездов/сут,} \quad (18)$$

где t_3^{cp} — средняя продолжительность занятия пути блок-поездом, мин;

$\alpha_{\text{исп}}^{\text{уд.п.}}$ — степень использования удлинённых путей.

Степень использования удлинённого пути на станции преобразования зависит от преобразуемого поездопотока (рис. 4). Так, увеличение доли формируемых блок-поездов свыше 60—70% от общего поездопотока, достигающего по величине в исходном состоянии 100—140 пар, потребует сооружения на станции преобразования второго пути двойной длины в каждом направлении движения.

Таким образом, удлинённые приемоотправочные пути на технических станциях и предузловые станции преобразования блок-поездов являются необходимой составной частью технической основы организации совместного пропуска поездов различных весовых категорий.

Для организации стабильного пропуска поездов повышенной массы и длины совместно с поездами других весовых категорий необходимо иметь на определенной части станций направления удлинённые приемоотправочные пути. В первую очередь удлинённые пути должны иметь технические станции

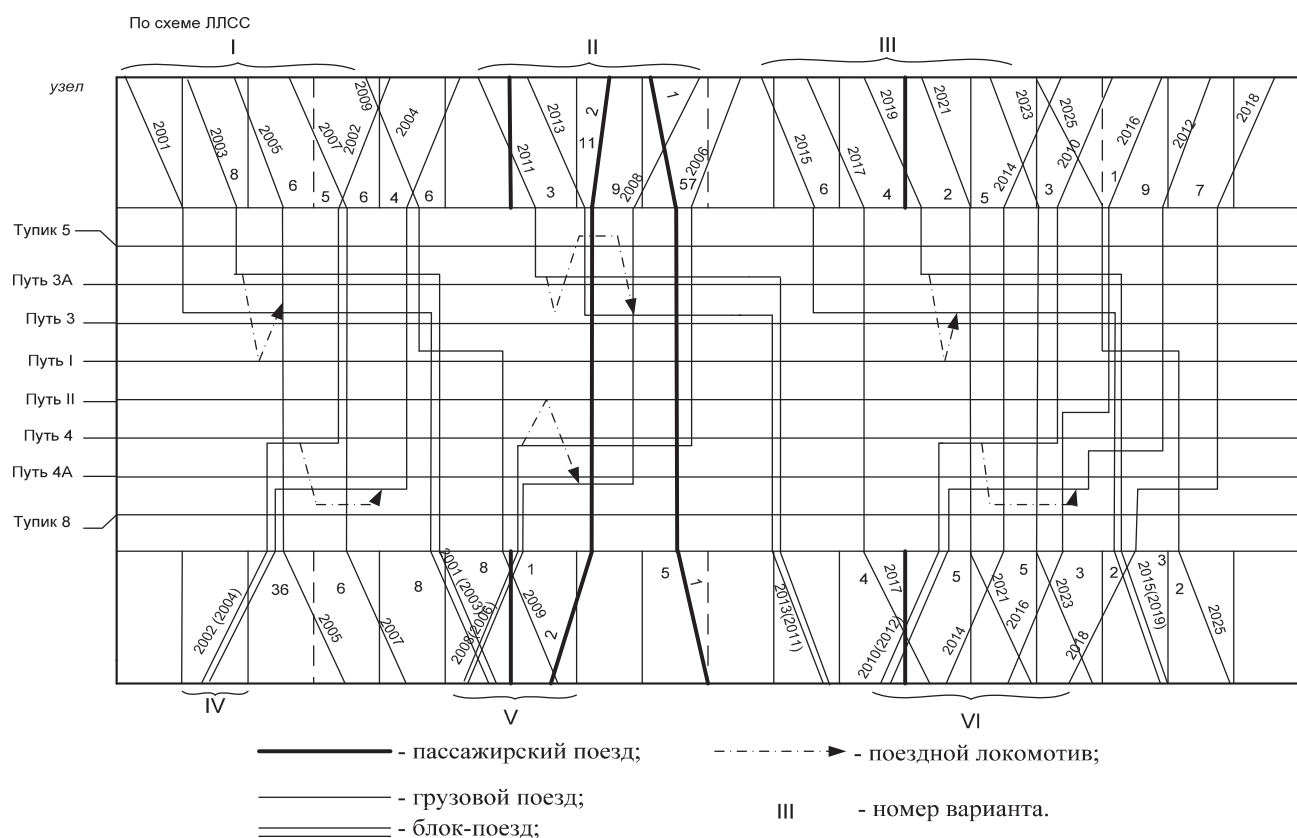


Рисунок 36 — Варианты поездного положения на станции преобразования

(1050—1250 м), обгонные пункты и станции преобразования (двойной длины — 1700 м и более).

Для организации обращения блок-поездов необходимо иметь удлиненные станционные пути, на которых производятся преобразования одинарных поездов в блок-поезда и обратно. Для этой цели целесообразно использовать предузловые станции, ограничивающие участок обращения блок-поездов. Конструкция предузловых станций преобразования должна обеспечивать соединение и разъединение блок-поездов со схемами ЛСС и ЛЛСС (т. е. при постановке локомотивов в голову блок-поезда). Расстояние между станцией преобразования и узловой технической станцией, ограничивающей участок обращения блок-поездов, не должно превышать при размерах суточного движения 90—100 пар грузовых поездов и 20—30 пар пассажирских по максимуму 9,6—15,3 км и по минимуму 4 ($I_p = 8$ мин) — 10,6 ($I_p = 10$ мин) км.

Работа пунктов преобразования может быть организована по двум вариантам: поездному и вывозному. Поездный принцип заключается в том, что в процессе преобразования блок-поездов участвуют только поездные локомотивы, следующие в голову блок-поезда или одинарных составов. Вывозной принцип предусматривает наличие определенной группы локомотивов, обращающихся между предузловой станцией преобразования и узлом. Работу станций преобразования целесообразно организовывать по вывозному принципу.

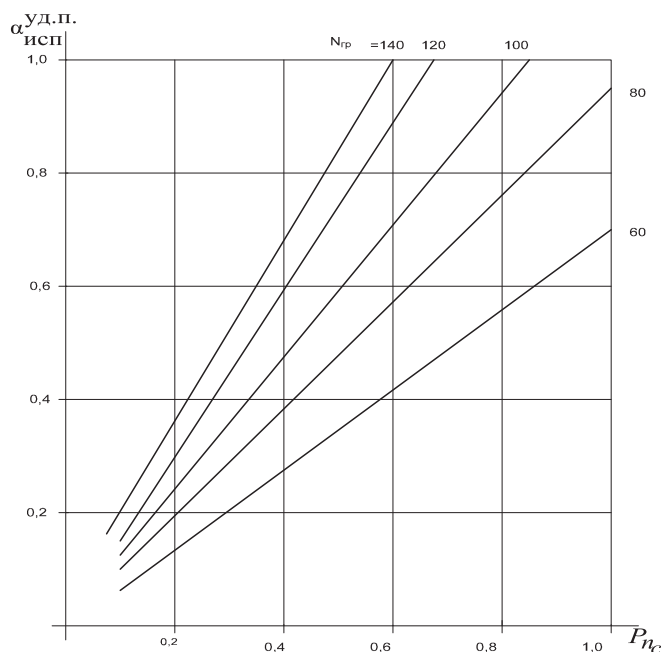


Рисунок 4 — Зависимость степени использования одного удлиненного пути на станции преобразования от величины доли блок-поездов в общем поездотоке в одном направлении движения

Расчет потребного числа путей двойной длины на станциях преобразования и выбор принципиальных схем путевого развития этих станций показал, что для формирования блок-поездов один удлиненный станционный путь должен обеспечивать пропуск от 31 до 35 блок-поездов в зависимости от расстояния между станциями преобразования и узлом,

размеров движения грузовых и пассажирских поездов по участку и доли блок-поездов в общем потоке. Пропускная способность удлиненного пути, на котором осуществляется разъединение составов, составляет 24—41 блок-поезд. При вывозном принципе — соответственно 35 и 41, при поездном — 31 и 24 [8].

Литература

1. Плехотич С.А. Техничко-технологические параметры железнодорозных направлений в условиях параллельных норм массы и длины грузовых поездов : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2011. 172 с.
2. Фролова И.И. Формализация задачи организации параллельного обращения поездов разной категории и норм массы и длины // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура : матер. науч.-техн. конф., посв. 55-летию УрГУПС : в 2 т. / Уральский государственный университет путей сообщения. Екатеринбург, 2011. Вып. 97 (180). Т. 1. С. 1042—1050.
3. Макарошкин А.М., Дьяков Ю.В. Использование и развитие пропускной способности железных дорог // Новое в жизни, науке, технике. Сер. Транспорт. М. : Знание, 1985. № 12. 64 с.
4. Макарошкин А.М. Пути повышения пропускной способности транспортных систем (повышение пропускной способности железных дорог и интенсификация поездной работы) // Итоги науки и техники. Сер. Железнодорожный транспорт. 1987. Т. 15. С. 3—70.
5. Сотников И.Б. Взаимодействие станций и участков железных дорог. М. : Транспорт, 1985. 270 с.
6. Инструкция по определению станционных и межпоездных интервалов : Утв. Глав. упр. движ. МПС, № ЦД/3732; введ. 11.01.79 взамен ЦД/2702 от 20.04.70. М. : Транспорт, 1980. 32 с.
7. Павловский И.Г., Перминов А.С., Чернюгов А.Д. Организация движения соединенных поездов. М. : Транспорт, 1977. 128 с.
8. Плехотич С.А. Пропускная способность двухпутных участков в условиях обращения грузовых поездов различной массы и длины // Вестник УрГУПС. 2009. № 3—4. С. 48—55.

References

1. Plakhotich S.A. Tekhniko-tehnologicheskie parametry zheleznodorozhnykh napravlenij v uslovijakh parallelnykh norm massy i dliny gruzovykh poezdov: monografija [Technical and technological parameters of railway directions in conditions of parallel norms of mass and length of freight trains: monograph]. Ekaterinburg: UrGUPS, 2011. 172 s.
2. Frolova I.I. Formalizatsiya zadachi organizatsii parallelnogo obrashchenija poezdov raznoj kategorii i norm massy i dliny [Formalization of problem of parallel trains' handling of different kinds and norms of mass and length] // Transport XXI veka: issledovaniya, innovatsii, infrastruktura: materialy nauch.-tekh. konf., posv. 55-letiju UrGUPS: v 2 t. / Uralskij gosudarstvenny universitet putej soobshchenija. Ekaterinburg, 2011. Vyp. 97(180). t. 1. S. 1042 – 1050.
3. Makarochkin A.M., Dyakov Yu.V. Ispolzovanie i razvitie propusknoj sposobnosti zheleznykh dorog [Use and improvement of railways' capacity] // Novoe v zhizni, nauke, tekhnike: Ser. Transport. M.: Znanie, 1985. № 12. 64 s.
4. Makarochkin A.M. Puti povyshenija propusknoj sposobnosti transportnykh sistem (povyshenie propusknoj sposobnosti zheleznykh dorog i intensifikatsiya poezdnoj raboty) [Ways of transport systems' capacity increase (increase of railways' capacity and train service intensification)] // Itogi nauki i tekhniki: Ser. Zheleznodorozhny transport. 1987. T. 15. S. 3–70.
5. Sotnikov I.B. Vzaimodejstvie stantsij i uchastkov zheleznykh dorog [Coordination of station and railway districts]. M.: Transport, 1985. 270 s.
6. Instruksija po opredeleniju stantsionnykh i mezhpoezdnykh intervalov [Instructions on detection of station and train-to-train intervals]: Utv. Glav. upr. dvizh. MPS, № CD/3732: Vved. 11.01.79 vzamen CD/2702 ot 20.04.70. M.: Transport, 1980. 32 s.
7. Pavlovsky I.G., Perminov A.S., Chernyugov A.D. Organizatsiya dvizhenija soedinennykh poezdov [Traffic organization of coupled trains]. M.: Transport, 1977. 128 s.
8. Plakhotich S.A. Propusknaja sposobnost dvukhputnykh uchastkov v uslovijakh obrashchenija gruzovykh poezdov razlichnoj massy i dliny [Double-track lines' capacity in conditions of freight trains traffic of different mass and length] // Vestnik UrGUPS. 2009. № 3–4. S. 48–55.

УДК 656.073: 658.8

Оксана Дмитриевна Покровская, старший преподаватель кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ), Новокузнецк

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИНАЛЬНОЙ СЕТИ РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ)

Oksana D. Pokrovskaya, senior teacher of "Transport organization and management on transport" department, Siberian State Industrial University (SibGIU), Novokuznetsk

Definition Of Parameters Of A Region's Terminal Network (By The Example Of Kemerovo Region)

Аннотация

Статья посвящена комплексному определению параметров терминальной сети региона, включая число и дислокацию ее узлов (терминалов) и вида транспортного обслуживания. Терминальная сеть как совокупность централизованно управляемых грузовых терминалов рассматривается в качестве системообразующего элемента в процессе организации регионального грузодвижения. Предложена методика формирования и комплексного расчета параметров терминальной сети. На основе расчета ряда параметров найден наилучший вариант терминальной сети.

Ключевые слова: терминальная сеть, логистический накопительно-распределительный центр, наилучший вариант терминальной сети, пространственно-количественные параметры, транспортные параметры, политранспортное обслуживание, вариант количества терминалов, вариант дислокации терминалов, методика формирования и комплексного расчета параметров терминальной сети.

Annotation

The article is devoted to complex definition of parameters of a region's terminal network including quantity and disposition of its junctions (terminals) and a kind of transport service. The terminal network as a set of overall operated cargo terminals is considered as a backbone element in organization of regional cargoes' transportations. The method of formation and complex calculation of a terminal network's parameters is offered. On the basis of calculation of some parameters the best variant of a terminal network is found.

Key words: terminal network, logistic accumulation-distribution center, the best variant of a terminal network, spatially-quantitative parameters, transport parameters, polytransport service, variant of terminals' quantity, variant of terminals' disposition, method of formation and complex calculation of a terminal network's parameters.

Транспортной стратегией РФ до 2030 г. предусмотрено создание опорной сети транспортно-логистических центров в ключевых регионах России. В этом качестве могут рассматриваться грузовые терминалы, объединенные в региональную терминальную сеть.

Зарубежный опыт показывает, что для ускорения экономических процессов и совершенствования систем доставки груза необходимо создание «терминальных деревень», мультимодальных хабов.

Актуальность исследования связана с тем, что в России формирование подобных комплексов идет стихийно, простым скоплением объектов транспортно-логистического и торгового бизнеса, при отсутствии научно обоснованной методики их проектирования и развития.

Вопрос расчета параметров терминальной сети (включая комплексный выбор количества терминалов, их дислокации, вида транспорта) прежде в своем триединстве не ставился.

Цель работы заключается в определении параметров терминальной сети региона по комплексной методике их формирования и расчета. Предлагается организовать перевозку массовых сыпучих грузов по терминальной политранспортной схеме с расчетом состава терминальной сети и выбором вида транспортного обслуживания.

Особенностью предлагаемой методики является комплексность проведения расчета параметров терминальной сети, т. е. одновременный выбор пространственно-количественных параметров терминальной сети по числу терминалов на территории региона и дислокации в ней узлов, и вида ее транспортного обслуживания. Итеративным расчетом сочетаний числа и дислокации по этим методикам определяется рациональный вариант комплексного построения состава терминальной сети и ее транспортного обслуживания, т. е. наилучший вариант терминальной сети региона.

Для аккумуляции и управляемого централизованного распределения грузопотоков формируется сеть грузовых терминалов, или логистических накопительно-распределительных центров (далее — ЛНРЦ), как комплексных интегрированных систем грузодвижения, состоящих из территориально разоб-

ценных объектов, технологически связанных между собой выполняемыми функциями по сбору, переработке, распределению и доставке грузов.

В свою очередь, терминальная сеть — это совокупность взаимодействующих и централизованно управляемых узлов (терминалов, или ЛНРЦ), обеспечивающая межрегиональную интеграцию и выходы на транспортные коридоры страны.

Основные параметры терминальной сети можно классифицировать следующим образом: 1) пространственно-количественные; 2) транспортные.

Исходные параметры терминальной сети внесены в табл. 1 [1].

Таблица 1 — Исходные параметры терминальной сети

Категория параметров	Параметр
<u>Транспортные</u> — для автомобильного транспорта	Маршрут перевозки Расстояние перевозок по маршруту $L_{\text{авт}}$, км Объем перевозок по маршруту $Q_{\text{перв}}$, т/сут Эксплуатационная скорость подвижного состава $V_{\text{экспл.}}$, км/ч Грузоподъемность подвижного состава $q_{\text{авт}}$, т Статический коэффициент использования грузоподъемности $\gamma_{\text{ст}}$ Норма расхода топлива $N_{\text{расх}}$, л/100 км Стоимость топлива $S_{\text{топлив}}$, у.е./л Коэффициент учета накладных расходов Коэффициент неравномерности поступления груза в месяц $K_{\text{м}}$ Продолжительность одной смены $T_{\text{смен}}$, ч Количество смен в сутки $N_{\text{смен}}$ Норма рентабельности перевозок R , %
	Маршрут перевозки Расстояние перевозок по маршруту $L_{\text{жт}}$, км Объем перевозок по маршруту $Q_{\text{перв}}$, т/сут Грузоподъемность подвижного состава $q_{\text{авт}}$, км/ч Статический коэффициент использования грузоподъемности $\gamma_{\text{ст}}$ Тариф на перевозку (в соотв. с прейскурантом) T
— для железнодорожного транспорта	
<u>Пространственно-количественные</u>	Варианты количества ЛНРЦ в составе терминальной сети (с учетом секторного зонирования территории) Варианты дислокации ЛНРЦ в составе терминальной сети (точки привязки к реальным объектам) Взаимное размещение групп обслуживаемых предприятий Стоимость строительства площади ЛНРЦ, у.е./м ² Стоимость переработки груза на ЛНРЦ, у.е./т Грузооборот одного ЛНРЦ $Q_{\text{ЛНРЦ}}$, т/сут

К пространственно-количественным параметрам относятся состав терминальной сети по числу и дислокации находящихся в ней узлов — ЛНРЦ и зоны тяготения к ним промышленных предприятий.

К транспортным параметрам относятся вид транспорта, а также вид транспортного обслуживания терминальной сети: политранспортное (средствами нескольких видов транспорта)

или монотранспортное (средствами одного вида транспорта); вид перевозки: магистральная, прямая, терминальная. Вид транспорта по каждой транспортной связи может быть различным.

Задача формирования терминальной сети решалась для крупных вывозных добывающих регионов «внутреннего» типа и основывалась на уже сформировавшейся транспортной схеме региона покрытия. Так, в транспортной схеме рассматриваемого региона — Кемеровской области — реально получили свое развитие только автомобильный и железнодорожный транспорт, что учитывалось при расчете транспортных параметров терминальной сети.

Выходные параметры терминальной сети приведены в табл. 2 [1].

Таблица 2 — Основные выходные параметры терминальной сети

Категория параметров	Параметр
<u>Пространственно-количественные</u>	Число ЛНРЦ (узлов) в составе терминальной сети Дислокация ЛНРЦ в регионе Непосредственная близость (размещение) крупных промышленно-транспортных узлов Зоны тяготения групп обслуживаемых предприятий к ЛНРЦ
<u>Транспортные</u>	Средние расстояния доставки при политранспортном и монотранспортном обслуживании терминальной сети $L_{\text{ср}}$, п/т; $L_{\text{ср}}$, м/т, км А; Ж; А+Ж Наилучший вид транспорта (сочетание видов транспорта) для обслуживания терминальной сети
<u>Итоговые</u>	Затраты на терминальную перевозку $S_{\text{тран.}}$, руб./год Затраты на строительство и содержание ЛНРЦ в регионе (в соответствии с числом ЛНРЦ) $S_{\text{строит.}}$, руб./год Суммарные затраты на обслуживание перевозок через ЛНРЦ $S_{\text{сумм.}}^{(B; \lambda)}$, руб./год Экономическая эффективность применения политранспортного обслуживания терминальной сети по сравнению с монотранспортным N , % Экономическая эффективность применения терминальной технологии по сравнению с прямой M , %

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.

На транспортные параметры терминальной сети оказывают влияние следующие показатели: развитие и состав дорожной сети, наличие магистральных транспортных линий, наличие и развитие видов транспорта в регионе, дислокация и взаимное размещение транспортных узлов. Вид транспорта по каждой транспортной связи обуславливает транспортное решение терминальной сети.

Кроме перечисленных, на пространственно-количественное и транспортное решение терминальной сети воздействуют группы показателей: 1) социально-демографические (численность и уровень жизни населения, трудовые ресурсы); 2) административные (стратегическая программа развития экономики и транспорта региона, реализуемые региональные и правительственные программы); 3) экономические (стабильность роста товарооборота, налоговая и финансовая база, конкурентные условия на рынке, валовой региональный продукт, инвестиционная привлекательность перевозчиков и производителей); 4) промышленный потенциал (сырьевые ресурсы, объем отгружаемой промышленной продукции); 5) торговый потенциал (наличие и развитие складской и перегрузочной инфраструктуры, конкурентная среда, объемы розничной и оптовой торговли, наличие оптовых и дистрибьюторских компаний); 6) транспортные (отсутствие крупных транспортно-логистических операторов, уровень комплексного сервиса грузовладельцев, развитие транспортно-экспедиционного обслуживания, наличие и развитие транспортных коммуникаций, особенности транспортного обслуживания промышленных предприятий, наличие спроса на транспортно-логистические услуги); 7) географические (близость к рынкам производства и сбыта, географическое положение региона, взаимное расположение крупных промышленно-транспортных и населенных центров); экологическая ситуация.

Создание терминальной сети как современной системы транспортно-экспедиционного обслуживания региона позволит обеспечить быстрое перемещение грузов за счет организации рациональной товаропроводящей сети, обеспечить координацию работы различных видов транспорта, расширить комплекс предоставляемых клиентуре услуг.

При проектировании параметров терминальной сети следует учитывать не только затраты, сопутствующие перевозке, но и многовариантность возможных пространственно-количественных решений сети. Необходимость анализа большого числа возможных вариантов дислокаций ЛНРЦ, видов транспорта обусловлена поиском из всех существующих наиболее рационального варианта сочетания числа и дислокации терминалов в аспекте обеспечения минимума затрат. В основе методики формирования терминальной сети лежит итеративный метод. Рассчитываются все варианты организации терминальной сети в регионе и определяется наиболее выгодный [2].

В методике комплексного расчета параметров терминальной сети использована следующая терминология.

Вариант количества ЛНРЦ (ВЧ) — возможное количество терминалов в регионе (один-единственный в регионе, два и т. д.) из всех назначенных.

Вариант дислокации ЛНРЦ (ВД) — возможное размещение одного терминала или узлов терминальной сети в соответствии с количеством терминалов из назначенных вариантов.

Вариант терминальной сети — это одно из возможных сочетаний числа и дислокации терминалов.

Наилучший вариант терминальной сети (НВТС) — сочетание количества и дислокации ЛНРЦ и вида/видов транспорта

для их обслуживания, обеспечивающее минимальные суммарные затраты по реализации системы доставки груза по региону/регионам.

Наилучшее сочетание количества и дислокации терминалов, а также видов транспорта для их обслуживания обеспечит рационализацию регионального грузодвижения в части снижения затрат на перевозку и на формирование ЛНРЦ.

Методика комплексного формирования и расчета параметров терминальной сети региона следующая. Оцениваются все варианты числа и варианты дислокации терминалов при организации терминальной сети:

— по числу терминалов: от 1 до n в регионе;

— по дислокации терминалов: вблизи крупных городов и промышленно-транспортных узлов (рационализация сбора груза у поставщиков); вблизи пограничных пунктов выхода из области (рационализация дистрибуции груза потребителям); вблизи терминалов, ориентированных как на сбор, так и на дистрибуцию груза.

Выбирается вариант количества и вариант дислокации узлов терминальной сети — ЛНРЦ. Эти варианты назначаются в крупных промышленно-транспортных узлах с учетом зон тяготения к ним как пунктов выхода из региона, так и грузообразующих и грузопоглощающих предприятий. По минимальным расстояниям до «выходов» из региона определяются зоны тяготения к терминалам вывозных направлений. По расстояниям перевозок, размещению ЛНРЦ и пунктов грузообразования в регионе обслуживания определяются зоны тяготения предприятий к каждому ЛНРЦ.

ЛНРЦ следует размещать в точках, где формирование грузовых партий происходит с минимальными транспортными затратами. ЛНРЦ должны быть равноудалены от групп предприятий своей зоны тяготения и приближены к одному из крупных городов для обеспечения инфраструктурой и трудовыми ресурсами.

Дислокация как точка привязки местоположения ЛНРЦ к объекту на территории конкретизируется в реальных условиях на местах (рис. 1).

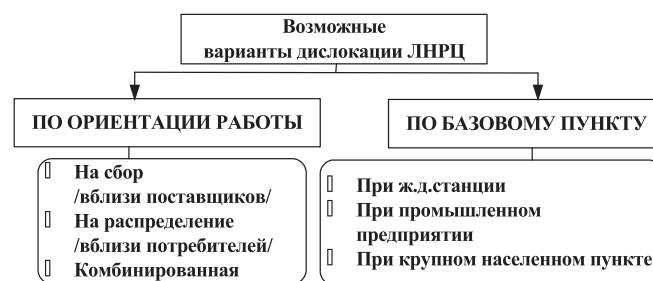


Рисунок 1 — Возможные варианты дислокации ЛНРЦ в регионе

Для проектирования терминальной сети необходимо провести анализ полигона обслуживания: 1) определить промышленно-транспортные узлы в регионе и провести секторное зонирование территории с учетом размещения этих узлов; 2) выявить особенности транспортно-экспедиционного обслуживания вывоза промышленной

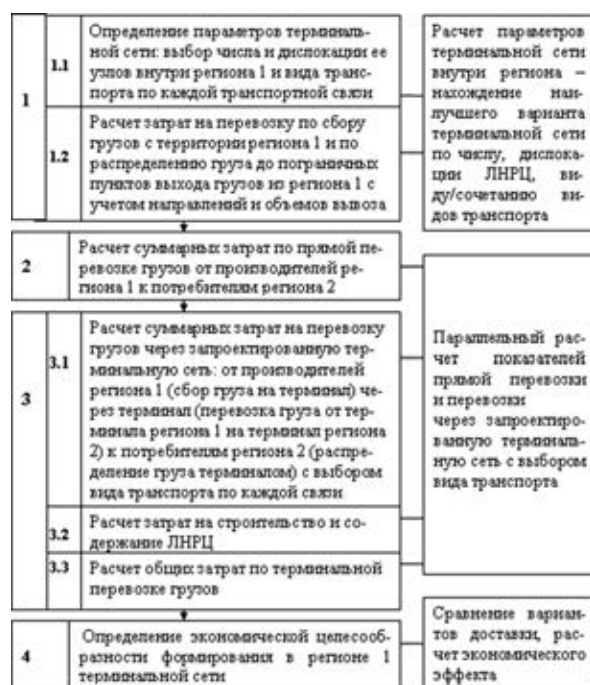


Рисунок 2 — Последовательность расчета параметров терминальной сети

продукции и мощность направлений вывоза; 3) оценить развитие автомобильных и железных дорог. На основе проведенного анализа выбираются пункты, в которых возможна организация ЛНРЦ. Учитывается географическая близость к пунктам «выхода» из региона; взаимное расположение поставщиков продукции, подлежащей вывозу;

уровень развития промышленности. Затем определяется НВТС путем комбинирования сочетаний варианта числа и дислокации ЛНРЦ и видов транспорта [3].

Через терминальную сеть осуществляется трехэтапная терминальная перевозка с выбором вида транспорта по каждому участку доставки: аккумуляция груза на сети ЛНРЦ; межтерминальная (магистральная) перевозка от ЛНРЦ расчетного региона к перерабатывающим пунктам стороннего региона; распределение груза конечным потребителям.

Подробнее последовательность расчета параметров и принятия решений при формировании терминальной сети региона представлена на рис. 2 и 3.

В соответствии с методикой комплексного расчета проанализированы 4 варианта количества и 67 вариантов дислокации ЛНРЦ в условиях Кемеровской области. В каждой группе сделана выборка наилучших вариантов, на которые приходится минимальные значения суммарных затрат.

Выбор НВТС из расчетных групп показан в табл. 3 жирным шрифтом.

Сокращение затрат на перевозку при использовании предлагаемой терминальной политранспортной сети по сравнению с существующей прямой монотранспортной составило 48976,18 млн руб./год.

Полученный НВТС показан на карте региона и в виде схемы (рис. 4).

Таким образом, в процессе исследования решена задача комплексного определения параметров проектируемой терминальной сети.

Для условий Кемеровской области рационально формирование терминальной сети со следующими параметрами:



Рисунок 3 — Процесс принятия решений при формировании терминальной сети

Таблица 3 — Выбор наилучшего варианта терминальной сети

Количество и дислокация ЛНРЦ	Затраты на перевозку груза $S_{\text{тран. сумм.}}$ млн руб./год	Затраты на строительство ЛНРЦ $S_{\text{строит.}}$ млн руб./год	Суммарные затраты $S_{\text{сумм.}}$ млн руб./год
РЦ 7 — Междуреченск	17260,85	1399,78	19660,63
РЦ 2,7 — Белово — Междуреченск	16261,56	2163,40	18424,96
РЦ 1, 2, 7 — Ленинск-Кузнецкий — Белово — Междуреченск	15034,25	2716,00	17750,25
РЦ 1, 2, 3, 7 — Ленинск-Кузнецкий — Белово — Новокузнецк — Междуреченск	14851,85	3545,98	21943,80

пространственно-количественные: количество ЛНРЦ — три, дислокация ЛНРЦ — по одному в каждом секторе (в Ленинске-Кузнецком, Белово, Междуреченске);
транспортные: вид транспортного обслуживания — политранспортное; вид перевозки — терминальная трехэтапная.



Рисунок 4 — Наилучший вариант терминальной сети

Литература

1. Воскресенская Т.П., Покровская О.Д. Параметрическое описание терминальной сети как основы единого транспортно-экспедиционного пространства региона: сб. науч. тр. // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии / СибГИУ. Новокузнецк, 2010. Вып. 25. С. 138—144.
2. Комаров К.Л., Воскресенская Т.П., Пахомова Г.Ф., Пахомов К.А., Покровская О.Д. Логистическая интеграция и координация сибирских регионов в контексте стратегии — 2030 // Железнодорожный транспорт. 2010. № 3. С. 57—60.
3. Воскресенская Т.П., Покровская О.Д. Методика и алгоритмизация принятия решений по формированию терминальной сети в регионе // Вестник УрГУПС. 2010. № 3 (7). С. 74—84.

References

1. Voskresenskaya T. P., Pokrovskaya O. D. Parametric description of a terminal network as the basis of transport and forwarding space of a region: collected scientific papers // Vestnik gorno-metallurgicheskoy seksii RAEN. Otdelenie metallurgii / SibGIU. Novokuznetsk. 2010. Vyp. 25. S. 138 – 144. ISSN 2073-2848.
2. Logisticheskaya integratsiya i koordinatsiya sibirskikh regionov v kontekste strategii—2030 [Logistic integration and coordination of Siberian regions according to strategy-2030] / K. L.Komarov, T. P.Voskresenskaya, G. F.Pakhomova, K. A.Pakhomov, O. D. Pokrovskaya // Zhelezнодорожный транспорт. 2010. № 3. S. 57– 60. ISSN 0044 – 4448.
3. Voskresenskaya T. P., Pokrovskaya O. D. Metodika i algoritimizatsiya prinjatija reshenij po formirovaniyu terminalnoj seti v regione [Decision making method and algorithmization of a terminal network formation in the region] // Vestnik URGUPS. 2010. № 3 (7). S. 74 – 84. ISSN 2079-0392.

УДК 656.212.2.073.21

Елена Николаевна Тимухина, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ПОВЫШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАНЦИЙ ЗА СЧЕТ ФИНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ

Elena N. Timukhina, PhD, associate professor, head of «Management of Exploitation Work» Department (USURT, Yekaterinburg)

Stations' Functional Reliability Improvement Based On Finite Processes Management

Аннотация

Если станция имеет явно выраженные узкие места, ее функциональная уязвимость весьма высока. Технологические сбои, такие как сдвиг груза, выход из строя средств автоматики, затрагивающие проблемные элементы, приводят к значительным технологическим и, как следствие, экономическим потерям. В связи с этим предлагается повысить функциональную надежность станции за счет эффективного использования оптимизирующей процедуры — имитационного метода динамического согласования, который основывается на финитном управлении процессами.

Ключевые слова: станция, технология, сбои, транспортная система, метод динамического согласования, имитационное моделирование, структура, адаптивность, надежность, накопление, ритмы, цепочки, заявки.

Annotation

If a station has evident "bottlenecks", its functional weakness is seen. Technological failures such as cargo shift, automatic devices' breakdown, problem elements lead to significant technological and, as a consequence, to economic losses. It is offered to improve functional reliability of a station due to effective use of optimizing technique, the simulation method for dynamic matching that is based on finite processes' management.

Key words: station, technique, failures, transport system, method of dynamic matching, simulation method, structure, adaptability, reliability, accumulation, rhythms, chains, requests

Функциональная надежность определяется в значительной мере последовательностью операций в технологическом процессе и управлением, т. е. выбором тех или иных технологических цепочек в различных ситуациях. При нерациональной «состыкованности» операций возникают узкие места технологии, при неразвитом управлении (*ограниченной адаптации системы*) требуются значительные резервы незанятости элементов. Степень согласованности параметров операций в структуре технологического процесса определяется моделированием.

В случае когда большое значение имеет обеспечение выходных ритмов потоков, функциональные возможности транспортной системы можно увеличить управлением потоками по конечным ритмам. Конечными ритмами могут быть:

- ритмы накопления составов поездов при подвязке к ниткам графика;
- ритмы отправления поездов по направлениям;
- ритмы погрузки или выгрузки грузов на различных фронтах (в особенности при наличии контактного графика) и др.

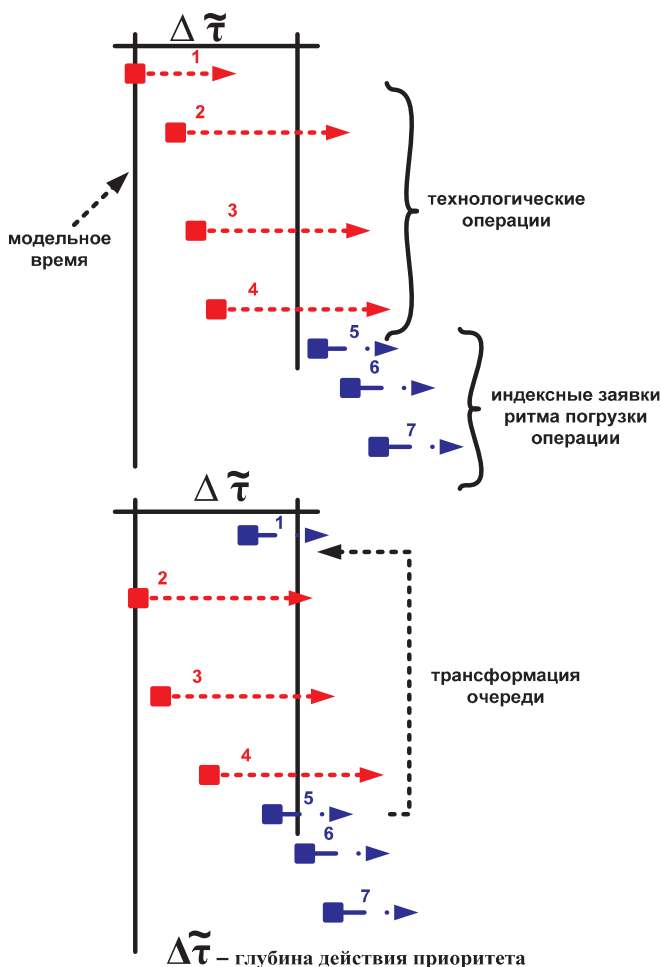
Для реализации вышеперечисленных функций можно использовать специальный *имитационный метод динамического согласования И-МДС* [1—3].

Чтобы процесс по некоторому критерию в обычных условиях был рационален, требуется проведение *большого числа экспериментов* на имитационной модели. В нашем случае проблема усложняется тем, что конечные ритмы будут обеспечивать цепочки из технологических операций разной длины. Необходимо оценить условия в начале каждой цепочки и выбрать время для начальной операции технологической цепочки, с тем чтобы конечная операция завершилась в требуемое время.

Финитное управление — управление, цель которого заключается в переводе объекта управления из заданного начального состояния в заданное конечное состояние за ограниченное время [4]. Это логическое выстраивание технологических цепочек по конечным ритмам (например, ритмам накопления составов на различные направления). Таким образом, предлагается расширить пределы использования имитационного метода динамического согласования для повышения адаптивности станций. Для реализации этой задачи

благодаря применению метода И-МДС заранее запускаются технологические цепочки в соответствии с их «длиной», тем самым предлагается запуск технологической линии с учетом возникшего сбоя.

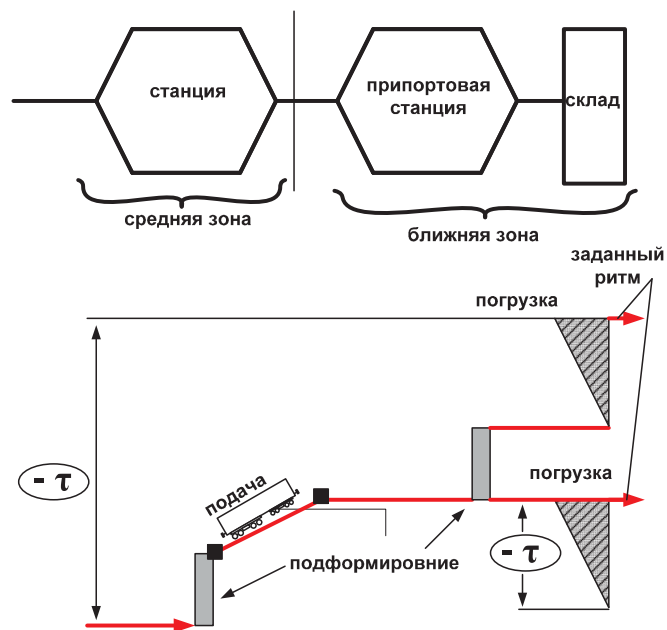
Реализацию И-МДС опишем на примере имитационной системы ИСТРА. Здесь технологический процесс задается в виде элементарных технологических операций, логически объединенных специальным оператором в технологический процесс. Очередь заявок на выполнение операций формируется следующим образом. После выполнения очередной операции проверяется, имеет ли операция продолжение и имеются ли условия для этого продолжения. Если эти условия выполняются, то в очередь записывается заявка на выполнение последующей операции с временем окончания предыдущей. Очередь все время упорядочивается с учетом приоритетов. Заявки с приоритетом переносятся в верх очереди, но только в том случае, если время заявки попадает в зону действия глубины приоритета (рис. 1).



С каким опережением по времени мы начинаем рассматривать заявку с приоритетом, нам говорит глубина приоритета. Допустим, необходимо обеспечить заданный ритм накопления составов. Но вагонопоток состоит из нескольких струй — из

вагонов в составах в предгорочном парке и в поездах с узловых станций. При этом технологические цепочки будут разной длины, однако они в совокупности должны обеспечить ритм накопления.

Здесь применяется следующий встроенный алгоритм. Вводится понятие индексной операции, которая, по сути являясь фиктивной, начинает выполнение технологической операции (рис. 2).



Фиксируется только сам факт ее выполнения. Заявки по индексным операциям задаются ритмом накопления. Эти заявки идут с большим приоритетом. При этом глубина приоритета равна продолжительности выполнения технологической цепочки. Как только индексная заявка попадает в глубину действия приоритета, она переносится в верх очереди и обслуживается первой.

Далее оператор проверяет условия включения в очередь одной из заявок начальных операций возможных технологических цепочек. Условия записываются в порядке предпочтительности. Например, сначала из вагонов на станции, чтобы освободить пути, затем со склада, затем из вагонов средней зоны. Если условия выполняются, то включается заявка начальной операции соответствующей технологической цепочки со временем, сдвинутым назад на время продолжительности цепочки ($-\tau$).

Алгоритм работы имитационного метода динамического согласования

Пусть задан ритм накопления моментами t_1, t_2, t_3, t_4 и т. д. (рис. 3).

Ломаная линия $Q(t)$ будет показывать потребность в вагонах с накоплением. Текущее время, т. е. время поступления самой ранней заявки в очереди, — t . Линии $q_a(t)$, $q_p(t)$ и $q_v(t)$ показывают наличие груза в трех местах, например: на складе $q_a(t)$, в вагонах на станции $q_p(t)$ и в составах на станции отстоя

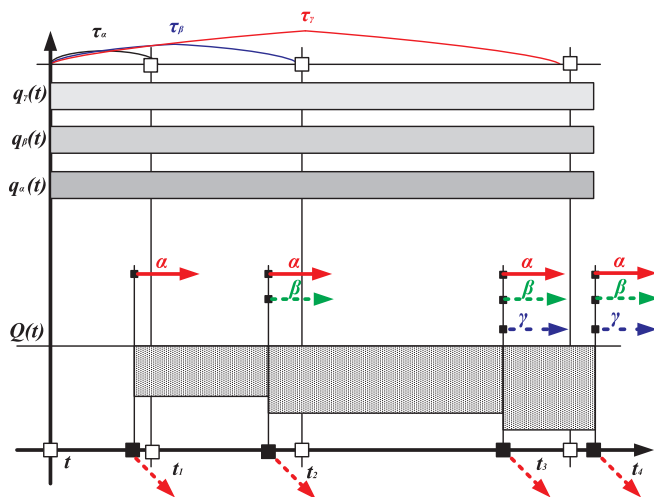


Рисунок 3 — Схема работы метода И-МДС

$q_\gamma(t)$. Так как после времени t не выполнялась ни одна технологическая операция, то состояние накопителей не меняется. Пусть продолжительность подачи из пункта q_α будет τ_α , из пункта q_β — τ_β и соответственно $q_\gamma(t)$ — τ_γ .

Вводим индексные операции типа α , β , γ с заявками ξ_α , ξ_β и ξ_γ , которые все имеют наивысший приоритет и глубину действия приоритета, соответственно τ_α , τ_β и τ_γ . Каждая из них может запускать технологическую цепочку подвода груза с отрицательным временем, равным времени подачи, т. е. $(-\tau_\alpha)$, $(-\tau_\beta)$, $(-\tau_\gamma)$. Но рассматриваться каждая заявка будет с положительным по отношению к моменту t опережением, т. е. в моменты $(t+\tau_\alpha)$, $(t+\tau_\beta)$, $(t+\tau_\gamma)$. Ритм погрузки может задаваться в цикле. Но глубина действия этих операций не должна быть меньше наибольшей глубины индексных операций, в данном случае — τ_γ .

Итак, для каждого момента погрузки t_1 , t_2 , t_3 и т. д. задаются заявки по трем индексным операциям: ξ_α , ξ_β , ξ_γ . Однако в момент t_1 мы видим заявку ξ_α лишь одной операции α , потому что ξ_β и ξ_γ были рассмотрены в предыдущее время с опережением. В момент t_2 есть две заявки: ξ_α и ξ_β , потому что обе они не могли быть обслужены ранее. Заявка ξ_β «вошла» в глубину действия приоритета лишь в момент t_2 , а заявка ξ_α еще не вошла вообще. В момент времени t_3 и далее будут представлены заявки всех типов индексных операций. Таким образом, в момент t рассматриваются заявка ξ_α для момента t_1 , заявка ξ_β для момента t_2 и заявка ξ_γ для момента t_3 .

Алгоритм действий здесь следующий.

Момент t_1

1) Проверяется условие, достаточно ли вагонов в предгорочном парке $q_\alpha(t_1)$, чтобы запустить заявку y_α начальной операции технологической цепочки расформирования (из пункта q_α),

$$Q(t_1) \leq q_\alpha(t_1) \Rightarrow y_\alpha(t_1 - \tau_\alpha). \quad (1)$$

Если да, то в очередь включается заявка операции y_α с отрицательным сдвигом $(-\tau_\alpha)$, чтобы успеть закончить операцию к моменту t_1 .

Момент t_2

Для обеспечения накопления следующего состава в момент t_2 проверяется достаточность вагонов в пунктах q_α и q_β , так как за время опережения τ_β вагоны могут быть подведены в промежутке $(t, t+\tau_\beta)$,

$$Q(t_2) \leq q_\alpha(t_2) \Rightarrow y_\alpha(t_2 - \tau_\alpha) \vee ((Q(t_2) > q_\alpha(t_2)) \wedge Q(t_2) \leq ((q_\alpha(t_2) + q_\beta(t_2)) \Rightarrow (y_\alpha(t_2 - \tau_\alpha) \vee y_\beta(t_2 - \tau_\beta)). \quad (2)$$

Если в пункте q_α нужных вагонов достаточно, то включается лишь операция $y_\alpha(t_2 - \tau_\alpha)$, если же нет, то добавляется и операция $y_\beta(t_2 - \tau_\beta)$ для подвода вагонов из пункта q_β .

Таким образом, при смещении текущего момента t рассматриваются индексные заявки, попадающие в глубину действия своего приоритета. Алгоритм запускает подвод вагонов непосредственно к моментам потребности в них, при этом очередность рассмотрения задает предпочтительность подвода из ближайших мест. Ее можно задавать различной, меняя приоритеты индексных заявок.

Менять приоритет заявок и глубину его действия можно по-разному, но все же целенаправленно, выстраивая технологический процесс. Ведь технологическим цепочкам подвода вагонов тоже можно присваивать приоритеты, чтобы возможные межоперационные простои не сильно сбивали ритм накопления составов. Величину такого рода приоритетов и глубину их действия можно выбрать с помощью имитационных экспериментов.

Таким образом, метод И-МДС позволяет выстроить технологические процессы в транспортной системе по конечным ритмам, т. е. технология становится целенаправленной. Если при выполнении технологических цепочек возникают задержки, зависящие от уровня загрузки станции, то время опережающего сдвига $(-\tau)$ может быть увеличено на их величину.

Применение метода И-МДС может стать эффективным способом совершенствования технологических процессов на железнодорожных станциях и в узлах.

Повышение адаптивности станции за счет применения метода И-МДС

При использовании метода динамического согласования МДС [5] модель выстраивает технологическую цепочку не с учетом приоритета конечных ритмов, а с учетом приоритета технологических операций. Например, модель сначала пропускает поезд, а потом выстраивает маневровую работу с учетом этого — так поступает и маневровый диспетчер. Но, допустим, необходимо обеспечить заданный ритм накопления составов. Метод И-МДС позволяет своевременно запускать технологические цепочки разной длины, чтобы обеспечить ритмы накопления составов в соответствии с ритмами прибытия поездов локомотивов с двух направлений — со станций призыва Казинка и Чугун-2. Нужные вагоны для накопления состава могут быть в трех местах (рис. 4):

- в парке А составы прибывают со станций завода;
- в парке В — с других станций промышленного узла;
- в парке для порожних вагонов, убираемых с вагонопрокидывателей.

По каждой цепочке вагоны могут поступить в сортировочный парк Б за разное время:

- за 20 мин из парка Г;
- за 40 мин из парка В;

- за 70 мин с накопления порожних вагонов (так как вагоны осматриваются и взвешиваются).

Метод И-МДС позволяет рассчитать режимы работы двух маневровых локомотивов и соответственно ритмы подачи вагонов на горку из всех трех мест. Следует помнить, что порожние вагоны теперь частные и назначения их следования после выгрузки определяет собственник. Расчеты на модели показали, что перерабатывающая способность станции возрастает, тем более в негативных условиях сходов на стрелках (рис. 5), т. е. снижается функциональная уязвимость станции, повышается ее функциональная надежность и перерабатывающая способность.

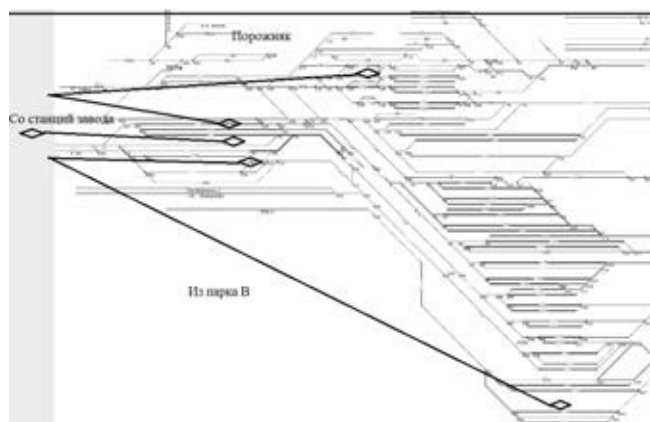


Рисунок 4 — Варианты подачи составов для роспуска с горки

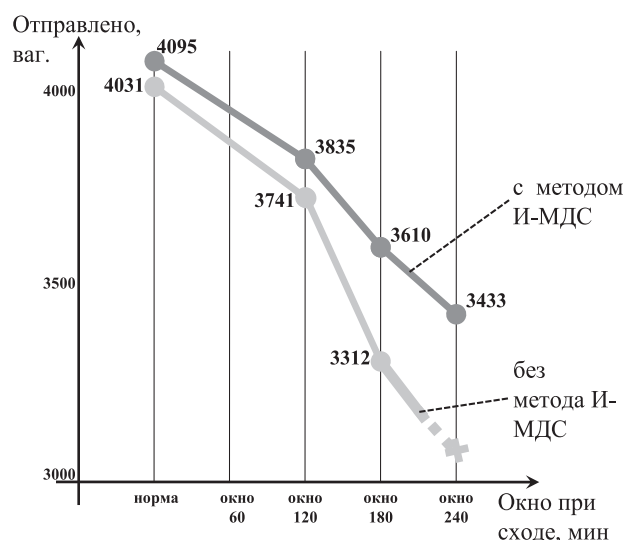


Рисунок 5 — Повышение производительности станции при сходе на стрелках 110 за счет адаптивности

Таким образом, открываются и предлагаются новые возможности имитационного метода динамического согласования, снижающие функциональную уязвимость станции при технологических сбоях. Эксперименты на модели показали высокую эффективность данной оптимизирующей процедуры, увеличивающей пропускную и перерабатывающую способность станции даже в условиях сбоев различной природы.

Литература

1. Козлов П.А., Миловидов С.П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. Вып. 3. С. 521—531.
2. Новиков П.А. Рациональное взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в припортовых транспортных узлах // Транспорт Урала. 2008. № 2. С. 72—75.
3. Новиков П.А. Имитационный метод динамического согласования как аппарат оптимизации сложных технологических процессов на транспорте // Транспорт Урала. 2008. № 3. С. 10—12.
4. Портал Управление / Московский государственный университет управления. <http://www.bigmanage.com/>
5. Козлов П.А., Александров А.Э. Автоматизированный программный комплекс расчета, регистрации и отображения работы сортировочной станции // Железнодорожный транспорт. 2003. № 9. С. 65—67.

References

1. Kozlov P.A., Milovidov S.P. Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebitel' [Structure optimization of transport flows in dynamics for customers' priority] // Ekonomika i matematicheskie metody. 1982. t. HVIII. Vyp.3. С. 521 – 531.
2. Novikov P.A. Ratsionalnoe vzaimodejstvie zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v priortovykh transportnykh uzлах [Rational cooperation of railway and sea transport in port traffic hubs] // Transport Urala. 2008. № 2 . S. 72 – 75.
3. Novikov P.A. Imitatsionny metod dinamicheskogo soglasovaniya kak apparat optimizatsii slozhnykh tekhnologicheskikh protsessov na transporte [Simulation method of dynamic matching as optimization method of complex technological operating procedures on transport] // Transport Urala. 2008. № 3. S. 10 – 12.
4. Portal Upravlenie [Administration portal] / Moskovskij Gosudarstvenny Universitet upravleniya. <http://www.bigmanage.com/>.
5. Kozlov P.A., Aleksandrov A.E. Avtomatizirovanny programmy kompleks rascheta, registratsii i otobrazheniya raboty sortirovochnoj stantsii [Automated bundled software of calculation, registration and work of marshalling yard] // Zheleznodorozhny transport. 2003. № 9. S. 65 – 67.

УДК 658.71

Маргарита Николаевна Нечаева, аспирант кафедры «Логистические транспортные системы и технологии» Московского института инженеров транспорта (МИИТ)

НОВЫЕ СПОСОБЫ ПЕРЕВОЗКИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В КОНТЕЙНЕРАХ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ CAR RACK И TRANS-RAK)

Margarita N. Nechaeva, post-graduate student of a chair 'Logistic transport systems and technologies' of Moscow Institute of Transport Engineers (МИИТ)

New Methods of Passenger Cars' Transportation in Containers (Using Additional Equipment: Car Rack and Trans-Rak)

Аннотация

Предложено два новых варианта перевозок легковых автомобилей в 40-футовых контейнерах с использованием дополнительного оборудования Car Rack и Trans-Rak. Ранее на территории РФ данные системы не применялись. Новое оборудование позволяет перевозить по 3 и по 4 машины в крупнотоннажном контейнере соответственно. Для системы Car Rack дано детальное описание процесса погрузки (выгрузки) автомобилей в (из) контейнеры. Приведена обзорная информация по производству и импорту легковых автомобилей в России за 2009—2011 гг. Для наглядности данной информации представлена карта России с автомобильными заводами.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, автомобильные перевозки, система Car Rack, система Trans-Rak, автомобильные заводы, транспортная система России.

Annotation

In the article they are offered two new options of passenger cars' transportation in 40-foot containers using additional equipment - Car Racks and Trans-Raks. Those transportation systems have never been used in the Russian Federation before. New equipment allows to transport 3 and 4 passenger cars in large containers respectively. Loading/unloading of passenger cars into/from container using Car Rack system is described in details and followed by charts. Information on passenger car manufacturing and import during 2009-2011 is reviewed in the article as well. In order to make the given information the map of Russia with car manufacturing plants is presented.

Key words: transportation in containers; passenger car transportation; Car Rack system; Trans-Rak system; car manufacturing plants; Russian transportation network.

В программе «Развитие транспортной системы России на 2010—2015 годы» прослеживается четкая связь и взаимодействие всех видов транспорта, а именно железнодорожного и автомобильного. Приоритетами данной программы стало скоординированное развитие всех видов транспорта и увязка их на основе схем территориального планирования федеральных планов развития с региональными транспортными системами, а также с комплексными программами развития других отраслей. В результате реализации программы планируется увеличить объем экспорта транзитных услуг в 1,9 раза, т. е. достигнуть \$23,4 млрд в год, и объем транзитных перевозок грузов по территории РФ в 1,4 раза, т. е. достигнуть 44,4 млн т в год. Реализация программы возможна при согласованных действиях по комплексному развитию транспортной отрасли.

Мероприятия подпрограммы «Железнодорожный транспорт» учитывают, что он обеспечит 33% потребности от всего пассажирооборота и 40% грузооборота на средние и дальние расстояния от всех видов транспорта. Также предусматривается строительство более 5 тыс. км новых железнодорожных линий и почти 3 тыс. км дополнительных главных путей. Скорость доставки контейнеров в транзитном сообщении планируется увеличить до 1000 км/сут. При этом объем перевозок транзитных контейнеров увеличится до 620 тыс. тэусов (ДФЭ). Общий объем перевозок контейнеров по сети железных дорог увеличится в 2 раза. Планируется обновить около 10 тыс. единиц тягового подвижного состава, 340 тыс. единиц грузовых вагонов.

Подпрограмма «Автомобильные дороги» предусматривает мероприятия по строительству и реконструкции 63,7 тыс. км дорог общего пользования федерального, регионального и межмуниципального значения, а также прочие мероприятия по развитию сети автомобильных дорог федерального значения, которые направлены на устранение разрывов и лимитирующих участков. Для пользователей тяжеловесного и крупногабаритного транспорта будет сохранена система индивидуальных разрешений и взимания платы. Применение данной системы должно способствовать перенесению этого

вида перевозок с автомобильного транспорта на железнодорожный [1].

В результате в программе «Развитие транспортной системы России на 2010—2015 годы» один из приоритетов связаны с изменением транспортной политики при поддержке государства. В 2011 г. льготное кредитование и утилизационная программа продолжали оказывать положительное влияние на автомобильный рынок. Поэтому высокие темпы роста продаж, заданные в 2010 г., сохранились и в 2011-м. Если год назад был отмечен 30%-й рост рынка, то теперь он был зафиксирован на уровне 40%. Таким образом, за весь прошлый год на территории Российской Федерации было реализовано 2,478 млн. легковых автомобилей, что более чем на 700 тыс. выше, чем годом ранее. В структуре продаж на долю отечественных производителей приходится только четверть рынка, хотя год назад этот показатель был выше 30%. По итогам 2011 г. на долю иномарок пришлось три четверти всего авторынka России. В количественном выражении это соответствует 1,86 млн единиц, что на 52,7% превосходит результат годичной давности. В то время как доля отечественных авто в течение года снижалась, сегмент зарубежных брендов, наоборот, рос. Эта тенденция будет прослеживаться в ближайшие 2—3 года. Рост рынка будет происходить преимущественно за счет иномарок [2].

На этом фоне правительство озвучило стратегическую задачу автопрограммы — до 80% всех автомобилей, продаваемых в России, к 2020 г. должно производиться внутри страны [3].

На рис. 1 показана динамика продаж автомобилей в России в 2008-2011 гг. (по кварталам).

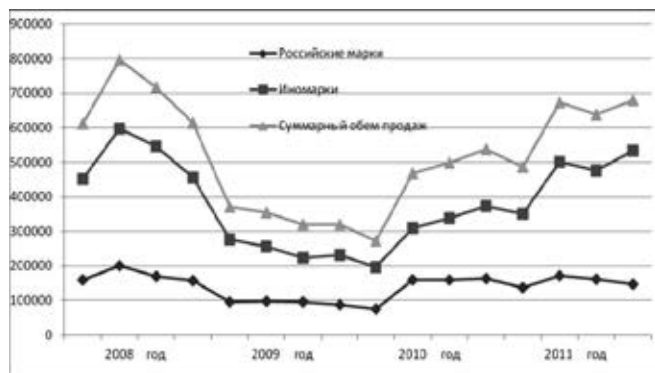


Рисунок 1 — Динамика продаж автомобилей в России в 2008—2011 гг.

Суммарная мощность российских заводов, выпускающих автомобили, — 1,5 млн машин в год [4]. На рис. 2 приведена карта России с заводами, производящими автомобили. Очевидно, что по мере появления новых моделей иномарок российской сборки импорт автомобилей будет сокращаться — ввозиться будут преимущественно дорогие модели, не пользующиеся массовым спросом. Параллельно будет наблюдаться рост внутренних перевозок от заводов-производителей к покупателям (дилерам) и увеличится поток иностранных автокомплектующих, запчастей и обслуживания.



Рисунок 2 — Расположение автомобильных заводов на территории РФ

Производители автомобилей также обратили внимание на глобальную контейнеризацию и увеличение спроса на продажу автомобилей, что повлекло за собой поиск новых возможностей по транспортировке и доставке легковых автомобилей до конечного потребителя.

В результате поиска новых решений были найдены различные варианты транспортировки автомобилей от производителей к потребителям. В данной статье приводятся два новых способа транспортировки легковых автомобилей, ранее не используемых в России.

Первый вариант. Транспортировка автомобилей в 40-футовых контейнерах с использованием дополнительного съемного оборудования — автомобильной эстакады (*Car Rack*). Автомобильная эстакада (*Car Rack*) — это специализированная конструкция из сварных стальных рам, которая располагается на полу контейнера [5]. На рис. 3 приведена схема размещения автомобилей в 40-футовом контейнере типа AAA при использовании автомобильной эстакады *Car Rack*.

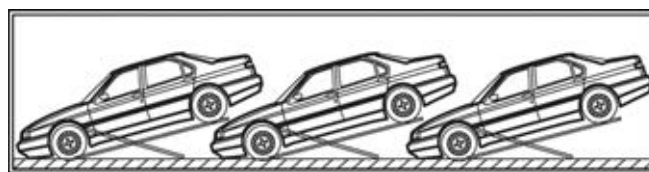


Рисунок 3 — Схема размещения автомобилей в сорокафутовом контейнере типа AAA с использованием автомобильной эстакады Car Rack

Эстакады оборудованы тремя направляющими платформами для размещения машин. Направляющие платформы оборудованы стопорами для упора передних колес автомобилей и рычагами с гидравлическими приводами для подъема платформы в транспортное положение. Загрузка контейнера происходит следующим образом.

- при помощи вилочного погрузчика перед погрузкой машин производят установку эстакады таким образом, чтобы ее колеса были установлены накатом внутрь контейнера;
- для заезда автомобилей на эстакаду рампы устанавливают в рабочее положение;
- погрузка машин производится в следующей последовательности:

- первый автомобиль по рампам своим ходом размещается на первой направляющей платформе;
 - после установки автомобиля перекидным рычагом при помощи гидравлического механизма направляющая платформа поворачивается в фиксированное наклонное положение под углом 30° ;
 - при помощи комплекта ремней закрепляются колеса автомобиля;
 - аналогично производится размещение и крепление следующих автомобилей. На рис. 4 приведена схема размещения и крепления машин до процесса закатки автомобильной эстакады в контейнер;
 - после размещения и закрепления трех машин снимаются рампы, используемые для заезда автомобилей;
 - далее эстакада при помощи вилочного погрузчика закатывается внутрь контейнера; На рис. 5 показана последняя стадия погрузки автомобилей в контейнер с использованием вилочного погрузчика. Погрузчик вкатывает автомобильную эстакаду в контейнер с уже закрепленными машинами;
- снятые рампы закрепляются на эстакаде, погруженной в контейнер при помощи штатного крепления;
- выгрузка эстакады из контейнера и автомобилей с эстакады производится в обратном порядке.

Использование данного оборудования сокращает процессы погрузки и выгрузки машин до 25—30 мин. Данный вариант транспортировки широко используется в Европе при доставке автомобилей от производителей к потребителям (дилерам). Особенно эффективно данное оборудование при отправка партий автомобилей через порты, так как исключается дополнительная закатка (выкатка) машин на судно, что, в свою очередь, гарантирует 100%-ю сохранность автомобиля.

Второй вариант: Транспортировка автомобилей в 40-футовых контейнерах с использованием дополнительного несъемного оборудования — автомобильной эстакады (*Trans-Rak*) [6]. На рис. 6 приведена схема размещения автомобилей в 40-футовом контейнере типа AAA с использованием системы крепления *Trans-Rak*.

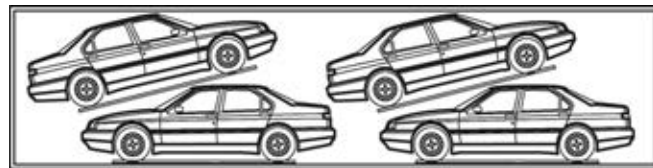


Рисунок 6 — Схема размещения автомобилей в 40-футовом контейнере типа AAA с использованием системы крепления *Trans-Rak*

Данное оборудование представляет собой прямоугольную стальную раму, подвешенную на четырех вмонтированных в контейнер фиксаторах. В 40-футовый контейнер монтируется четыре рамы общим весом 430 кг. Машины на верхнем уровне фиксируются за счет винтов на необходимый безопасный угол наклона. Машины на нижнем уровне также фиксируются рамами, но уже на поверхности пола контейнера. На рис. 7 показана последняя стадия погрузки автомобилей в контейнер.

Использование данной системы крепления сокращает процессы погрузки и выгрузки машин до 60 мин. Однако данное технологическое время выполняется только при условии работы хорошо подготовленной бригады мастеров по погрузке. Этот вариант транспортировки машин также широко используется в Европе.

Согласно «Техническим условиям размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах» (ТУ, глава 12) [7], на сети же-

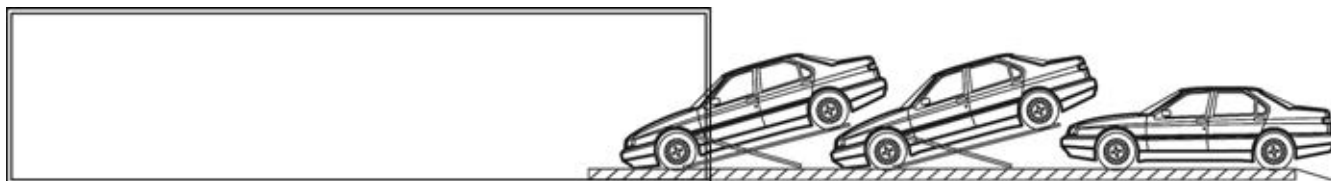


Рисунок 4 — Схема размещения и крепления автомобилей до закатки эстакады в контейнер

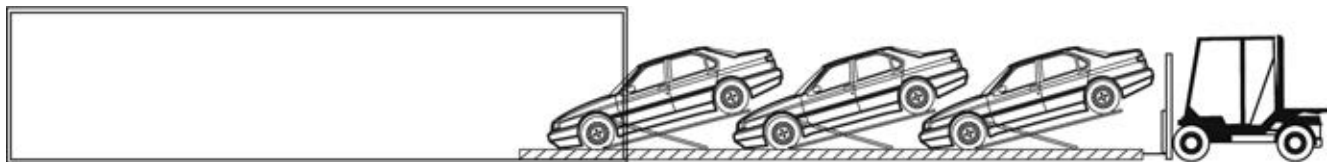


Рисунок 5 — Закатка автомобильной эстакады *Car Rack* в контейнер

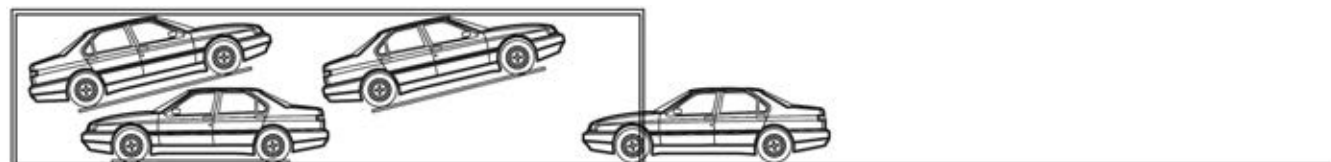


Рисунок 7 — Финальный этап погрузки автомобилей в 40-футовый контейнер типа AAA с использованием системы крепления *Trans-Rak*

лезных дорог России перевозки легковых автомобилей в крупнотоннажных контейнерах осуществляются только с помощью растяжек и упорных брусков максимум по два автомобиля в 40-футовом контейнере, эта схема представлена на рис. 8.

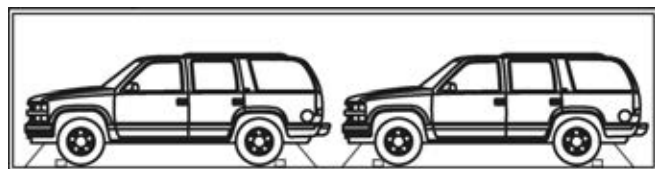


Рисунок 8 — Схема размещения автомобилей в 40-футовом контейнере типа ААА согласно ТУ

Таким образом, при транспортировке машин по территории РФ с использованием нового типа крепления или нового типа контейнера грузоотправителю необходимо разработать и согласовать местные технические условия (МТУ). По официальной информации министерства транспорта, только по первому варианту транспортировки автомобилей разработаны и согласованы МТУ.

Автор предлагает сравнить два варианта перевозок легковых автомобилей в контейнерах из Москвы в Новосибирск на примере использования логистической схемы доставки машин предприятия ОАО «Автофрамос»:

1-й вариант — согласно ТУ по 2 машины в контейнере;

2-й вариант — согласно МТУ на Car Rack по 3 машины в контейнере.

Для более наглядного расчета возьмем перевозку двух собственных 40-футовых контейнеров (тип ААА) с машинами на собственной удлиненной фитинговой платформе (длина 25,52 м). Данные для расчета сведены в табл. 1.

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что использование дополнительного оборудования Car Rack уменьшает себестоимость перевозки автомобилей в кон-

Таблица 1 — Данные для расчета по двум вариантам

Параметры перевозки	1 вариант	2 вариант
Станция отправления	Силикатная, МСК ж.д.	Силикатная, МСК ж.д.
Станция назначения	Новосибирск-Вост., ЗСБ ж.д.	Новосибирск-Вост., ЗСБ ж.д.
Расстояние перевозки, км	3260	3260
Наименование груза	Автомобили легковые	Автомобили легковые
Тип вагона	Удлин. фитинговая платформа	Удлин. фитинговая платформа
Тип контейнера	40-футовый	40-футовый
Крепление машин	Согласно ТУ	Согласно МТУ
Количество машин в контейнере, шт.	4	6
Срок доставки грузов, сут	21	21
Срок возврата оборудования, сут	Нет	14
Тариф за перевозку, руб./ваг.	92557,00	92557,00
Тариф за возврат контейнера с оборудованием, руб./ваг.	Нет	38600,00
Стоимость аренды контейнера, руб./сут	1000,00	1000,00
Себестоимость перевозки машины, руб.	28389,25	27692,83

тейнерах (даже при необходимости возврата специального оборудования в Москву). Более детальный расчет с учетом перевозок региональной логистики и модельного ряда автомобилей будет приведен в следующих публикациях.

Для выполнения программы «Развитие транспортной стратегии России» необходимо наладить взаимодействие между всеми видам транспорта, а не усиливать их конкуренцию. Нужно решить много важных проблем, таких как тарифное регулирование железнодорожных перевозок (автомобильный транспорт намного гибче), плановое и скоординированное развитие рынка автоперевозок (во избежание увеличения нагрузок на дорожную сеть) и др.

Литература

1. Мишарин А.С. Инструменты формирования и реализации стратегических направлений развития транспортного комплекса в РФ // Транспорт Урала. 2008. № 2 (17). С. 2—9.
2. Рынок легковых автомобилей в России. Итоги 2011 года / Аналитическое агентство «АВТОСТАТ» // Тенденции и перспективы. 2012. Январь. С. 6
3. Быстрее всех растут перевозки контейнерных грузов // Транспорт. 2011. № 6 (39). С. 12—16.
4. Автоперевозки: рост перед падением // Транспорт. 2011. № 1—2. С. 28—31.
5. Техническое описание автомобильной погрузочной эстакады Car Rack, номер спецификации NT-S-996, апрель 2007, Нантонг (Китай).
6. Техническое описание специализированного оборудования Trans-Rak. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.trans-rak.com/>
7. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах / «Юртранс». М., 2003.

References

1. Misharin A.S. Instrumenty formirovaniya i realizatsii strategicheskikh napravleniy razvitiya transportnogo kompleksa v RF [Formation and realization tools of strategic directions of transport complex development in RF] 2008. № 2 (17). S.2—9.
2. Rynok legkovykh avtomobilej v Rossii. Itogi 2011 goda [Cars' market in Russia. Totals of 2011] / Analiticheskoe agentsvo Avtostat // Tendentsii i perspektivy. 2012. Janvar'. S.6
3. Bystree vseh rastut perevozki kontejnernykh грузов [Container transportation grows faster] // Transport. 2011. № 6 (39). S.12—16.
4. Avtoperevozki: rost pered padeniem [Road transportation: growth before the decline] // Transport. 2011. № 1—2. S. 28—31.
5. Tekhnicheskoe opisanie avtomobilnoj pogruzochnoj estakady Car Rack, nomer spetsifikatsii NT-S-996 [Technical description of automotive loading ramp Car Rack, specification number NT-S-996], Aprel 2007, Nantong (Kitaj).
6. Tekhnicheskoe opisanie spetsializirovannogo oborudovaniya Trans-rak [Technical description of special-purpose equipment Trans-rak]: [sajt]. <http://www.trans-rak.com/>
7. Tekhnicheskie uslovija razmeshchenija i krepnenija грузов v vagonakh i kontejnerakh [Technical conditions of cargo placement and fastening in railway cars and containers] // Moskva : Uridicheskaja firma «Jurtrans». 2003.

УДК 656.025

Дмитрий Алексеевич Бруснянин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Александр Леонидович Казаков, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск,
Александр Михайлович Маслов, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры СУГР Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ МАРШРУТНОЙ СЕТИ МЕЖДУГОРОДНЫХ И ПРИГОРОДНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ*

Dmitry A. Brusyanin, PhD, associate professor «Railway Construction and Railway Track» Department, USURT, Yekaterinburg
Alexander L. Kazakov, DSc, associate professor, senior scientific associate, Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISDCT SB RAS), Irkutsk
Alexander M. Maslov, PhD, senior teacher of «Stations, Junctions and Freight Work» Department, USURT, Yekaterinburg

Optimization Of Regional Route Network Of Intercity And Commuter Traffic With The Use of Logistic Principles

Аннотация

Предложен новый подход к организации пассажирских перевозок в регионе на примере Свердловской области. Приведено описание предметной области, выполнен ее анализ. Рассмотрены основные проблемы существующей организации пассажирских пригородных и междугородных перевозок на автомобильном и железнодорожном транспорте. Построена обобщенная математическая модель.

Ключевые слова: оптимизация, маршрутная сеть, логистическая цепочка, пассажиропотоки, пригородные и междугородные пассажирские перевозки, автомобильный и железнодорожный транспорт

Annotation

A new approach to organization of passenger transportations in a region on the example of Sverdlovsk region is offered. The description of subject field is made and analyzed. The main problems of the existing commuter and intercity traffic by automobile and railway transport are described. A new approach to organization of passenger transportations in a region with the use of logistic principles for two kinds of transport railway and automobile ones is offered.

A new generalized mathematical model is built, the conclusions are made and recommendations are given.

Key words: optimization, route network, logistic chain, traffic flow, commuter and interurban traffic, automobile and railway transport.

Основной объем пассажирских региональных междугородных и пригородных перевозок на территории Свердловской области выполняется автомобильным и железнодорожным транспортом. Функции по организации и регулированию маршрутной сети междугородного и пригородного сообщения возложены на органы исполнительной власти. Применительно к автомобильному транспорту они заключается в согласовании маршрута (законодательно не предусмотрено ограничение количества компаний-перевозчиков на одном маршруте) и контроле соблюдения заданных маршрутов компаниями-перевозчиками преимущественно средствами навигации. На железнодорожном транспорте деятельность по перевозке пассажиров в пригородном сообщении осуществляет ОАО «Свердловская пригородная компания», получающая дотации из областного бюджета на поддержание социально значимых маршрутов.

К недостаткам существующей организации пригородных и междугородных перевозок в регионе можно отнести следующее. Во-первых, несбалансированное развитие и использование обоих видов транспорта. Так, появление частных автотранспортных компаний-перевозчиков привело к увеличению количества автобусных маршрутов и, как следствие, к перераспределению пассажиропотока между железнодорожным и автомобильным видами транспорта в сторону последнего. В результате снизилась эффективность использования железнодорожного транспорта, поскольку сократилось количество перевозимых пригородными электропоездами пассажиров. В то же время из-за отсутствия у органов исполнительной власти механизма регулирования маршрутной сети увеличение количества автобусных рейсов на ряде направлений привело к снижению наполняемости автобусов. Это позволяет сделать

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 11-07-00245).

вывод также о невысокой эффективности работы автомобильного транспорта [1].

Во-вторых, уменьшение количества перевозимых пассажиров железнодорожным транспортом привело к увеличению субсидий, выделяемых из областного бюджета для поддержания социально значимых направлений.

По мнению авторов, изменить сложившуюся ситуацию в сфере пригородных и междугородных пассажирских перевозок возможно путем оптимизации региональной маршрутной сети с применением логистических подходов. Рассмотрим основополагающие принципы такого подхода.

Первый принцип. Максимальное использование преимуществ каждого вида транспорта. В период максимальных суточных всплесков пассажиропотока, например утром и вечером, эффективнее использовать пригородный железнодорожный транспорт. Эффект даст повышение населенности вагонов электропоезда и снижение загруженности автомагистралей крупных городов за счет сокращения количества автобусных рейсов.

В период же, когда имеется небольшой относительно пиковой загрузки и равномерный пассажиропоток, например в дневное время суток, целесообразнее использовать автобусные перевозки, поскольку пригородные электропоезда нерентабельны ввиду недостаточного пассажиропотока для заполнения вагонов.

Второй принцип. Увязка нескольких видов транспорта, например железнодорожного и автомобильного, в одну логистическую цепочку. При таком подходе пассажир приобретает один билет в нужном ему направлении. Информационная система в автоматизированном режиме планирует варианты маршрута и предлагает наиболее подходящий.

Необходимо отметить, что первые два принципа позволяют перейти от конкуренции между видами транспорта к их интеграции в единую региональную пассажирскую транспортную систему. При этом конкуренция будет сохраняться между компаниями-перевозчиками и поможет максимально реализовать преимущества каждого вида транспорта: экологичность, безопасность, регулярность вне зависимости от погодных условий — для железнодорожного транспорта, гибкость расписания и возможность организации маршрутов в удаленные территории области — для автомобильного.

Третий принцип. Введение гарантированного уровня транспортного обслуживания населения области. Это позволит установить стандарты качества такого обслуживания.

Четвертый принцип. Построение единой информационно-аналитической системы (в перспективе АСУ), которая бы в автоматизированном режиме осуществляла расчет маршрутов следования для пассажиров, мониторинг пассажиропотока, формирование и коррекцию маршрутной сети.

Реализация такого подхода возможна при формировании оптимальной маршрутной сети пригородных и междугородных пассажирских перевозок региона. Для этого предлагается использовать логистические методы, положенные в основу освоения региональных грузопотоков [2].

Вопросы организации и планирования пригородных пассажирских перевозок достаточно подробно исследованы Ю.О. Пазойским [3, 4] и другими авторами [5—7]. Поэтому в настоящей статье внимание уделено планированию оптимально-

го распределения пассажиропотоков между автомобильным и железнодорожным транспортом в масштабах региона.

Рассмотрим обобщенную математическую модель маршрутной сети пригородных и междугородных пассажирских перевозок региона.

Пусть имеются населенные пункты A и B , перевозки пассажиров между которыми могут осуществляться несколькими видами транспорта (в данном частном случае — железнодорожным и автомобильным). Будем полагать, что каждый из видов транспорта способен перевезти всех пассажиров, и поставим задачу об оптимальном распределении пассажиропотока между ними. Оптимальным будем считать такое распределение, когда в максимальные пиковые значения пассажиропотока большинство пассажиров перевозится по железной дороге, а при небольшом пассажиропотоке — автомобильным транспортом.

Входным параметром является плотность пассажиропотока ρ , функцию $\rho(t) \geq 0$ считаем детерминированной. За начало отсчета выберем момент, когда значение $\rho(t)$ является минимальным, т. е. $\rho(0) = \min_{0 \leq t \leq T} \rho(t)$, где T — характерный промежуток

наблюдений (например, сут), если таких моментов больше одного, возьмем первый из них. Будем также полагать, что функция $\rho(t)$ является периодической с периодом T , $\rho(t+T) = \rho(t)$ и интегрируемой на всем периоде (в большинстве случаев данная функция, очевидно, является непрерывной).

Введем вспомогательную функцию $\Psi(t, \tau)$ по формуле

$$\Psi(t, \tau) = \int_t^{t+\tau} \rho(z) dz, \quad 0 \leq t \leq T, \quad 0 \leq \tau \leq T. \quad (1)$$

Функция $\Psi(t, \tau)$ показывает, сколько пассажиров необходимо перевезти за промежуток времени $[t, t+\tau]$. Она, очевидно, является непрерывной по обоим переменным и неотрицательной.

Кроме того, считаем заданными:

- максимально допустимое ожидание T_* пассажиром транспорта в дневное время (этот параметр будет критерием обеспечения удобства перевозок для пассажиров и гарантированного уровня транспортного обслуживания);
- минимальную наполняемость электропоезда N_* (этот параметр вводится с целью обеспечения рентабельности железнодорожных перевозок);
- максимальную вместимость электропоезда N^* (этот параметр является технологическим ограничением, а также характеризует комфортабельность перевозок);
- минимальную плотность пассажиропотока ρ_* , при котором производятся перевозки в ночное и дневное время (этот параметр вводится с целью обеспечения рентабельности автобусных перевозок и обеспечения гарантированного уровня транспортного обслуживания населения).

Параметром оптимизации выступает наполняемость транспортного средства.

Как показывает анализ пассажирских перевозок, обычно функция $\rho(t)$ в течение суток ведет себя следующим образом: в ночное время плотность пассажиропотока незначительна, в утренние и вечерние часы наблюдается пик, в районе обеда происходит некоторый спад (рис. 1). Поэтому логично начало отсчета времени $t=0$ определить на ночь.

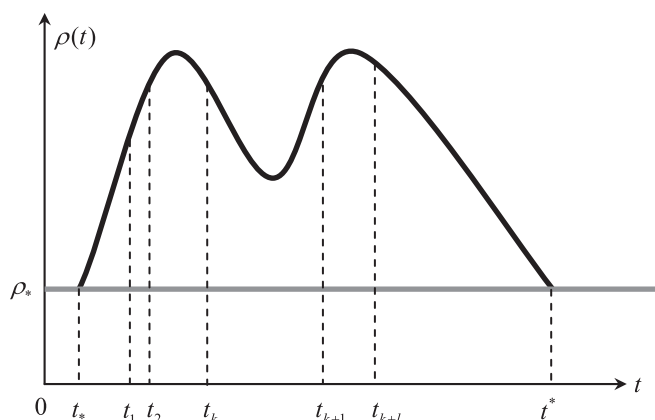


Рисунок 1 — Изменение плотности пассажиропотока в течение суток

Исходя из этого предлагается следующий подход к формированию маршрутной сети.

1. Если $\rho(0) < \rho_*$, то на некотором промежутке времени $[0, t_*]$ перевозки не производятся.

2. В момент времени $t = t_*$ начинаются автобусные перевозки. Здесь

$$t_* = \arg \min_{0 \leq t \leq T} \{\rho(t) \mid \rho(t) \geq \rho_*\}.$$

Отметим, что если $\rho(0) \geq \rho_*$, то $t_* = 0$, т. е. никаких рейсов не выполняется.

3. Далее рассматривается функция $\psi(t) = \Psi(t, T_*)$, $t \geq t_*$. Из (1) следует, что данная функция является непрерывной и неотрицательной. В ранние утренние часы она, кроме того, будет возрастающей (поскольку, как отмечалось выше, растет плотность пассажиропотока). Если в некоторый момент времени $t = t_1$ будет выполнено условие

$$\psi(t_1) = N_*, \quad (2)$$

то в этот момент перевозки выполняются железнодорожным транспортом (автобусные перевозки при этом сокращаются либо прекращаются вовсе). Условие (2) фактически означает, что средняя населенность вагона электропоезда, который отправляется в момент $t = t_1$, будет достаточна.

4. Далее рассматривается функция $\phi_1(\tau_1) = \Psi(t_1, \tau)$, $\tau \geq 0$. Из (1) следует, что данная функция является непрерывной, неотрицательной и неубывающей. Пусть найдутся значения τ_1 и τ_1^* такие, что $\phi_1(\tau_1) = N_*$, $\phi_1(\tau_1^*) = N^*$. Тогда:

а) если $\tau_1 > T_*$ (а также, если τ_1 не определяется вообще), то перевозки следует перенести на автомобильный транспорт;

б) если $\tau_1 < T_* < \tau_1^*$ (в том числе если τ_1^* не определяется вообще), то момент отправления второго поезда определяется как

$$t_2 = t_1 + T_*, \quad (3)$$

в) если $\tau_1^* < T_*$, то предлагается определять момент отправления второго электропоезда по формуле

$$t_2 = t_1 + \alpha T_* + (1 - \alpha) \tau_1^*, \quad (4)$$

где $\alpha = T_*/T^*$, $0 < \alpha < 1$

5. И так далее. Пусть k -й электропоезд отправляется в момент времени $t = t_k$. Тогда, если найдется τ_k , такое, что

$\phi_k(\tau_k) = \Psi(t_k, \tau_k) = N_*$, то время отправления $k+1$ -го поезда определяется по формулам (3) или (4) при соответствующей замене индексов. В противном случае перевозки переносятся на автомобильный транспорт.

6. При наступлении вечернего пика повторяется прежняя последовательность действий, начиная с пункта 3.

7. Ночью, когда плотность пассажиропотока падает ниже ρ_* , перевозки с момента времени $t = t^*$ прекращаются.

Далее рассмотрим модель организации перевозок в масштабах региона. Региональную систему наземного транспорта предлагается рассматривать как взвешенный мультиграф [8—9] (граф, в котором существует пара вершин, которая соединена более чем одним ребром) (рис. 2). Вершинами этого мультиграфа являются населенные пункты, а ребрами — железные дороги, автомобильные дороги и пассажиропотоки между населенными пунктами. Вес ребра — это соответственно пропускная способность дороги и плотность пассажиропотока.

$G = G(S, U_1, U_2, U_3)$ — мультиграф. Предполагаем, что он является деревом (т. е. в нем отсутствуют циклы).

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ — вершины графа (города области, населенные пункты);

$$U_i = \begin{pmatrix} u_{11}^i & u_{12}^i & \dots & u_{1n}^i \\ u_{21}^i & u_{22}^i & \dots & u_{2n}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1}^i & u_{n2}^i & \dots & u_{nn}^i \end{pmatrix}, i = 1, 2,$$

$$\Upsilon = \begin{pmatrix} \rho_{11}(t) & \rho_{12}(t) & \dots & \rho_{1n}(t) \\ \rho_{21}(t) & \rho_{22}(t) & \dots & \rho_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n1}(t) & \rho_{n2}(t) & \dots & \rho_{nn}(t) \end{pmatrix} \text{ — ребра,}$$

U_1 — железные дороги, U_2 — автомобильные дороги. Если $u_{kl}^i = 0$, $i = 1, 2$, то между данными населенными пунктами соответствующая дорога отсутствует. Если $u_{kl}^i > 0$, $i = 1, 2$, то дорога имеется и указанное число характеризует ее пропускную способность. Будем считать, что матрицы U_1 и U_2 являются симметрическими, т. е. пропускная способность дороги в обоих направлениях одинакова.

Υ — плотности пассажиропотоков между городами. Данная матрица также является симметричной ввиду отсутствия миграций населения в рассматриваемый временной интервал.

Для оптимизации перевозок в масштабах региона необходимо ранжировать все пары населенных пунктов по убыванию пассажиропотока и последовательно применять к каждой из них процедуру, описанную ранее.

Основные выводы и рекомендации

1. Предложенная модель может быть использована для формирования и коррекции маршрутной сети пригородных и местных пассажиропотоков Свердловской области. При этом функция $\rho(t)$, вообще говоря, может быть задана таблично с равным шагом по времени. В этом случае вычисление определенных интегралов следует вести при помощи численных методов. Например, по формуле Симпсона.

2. Разработанная математическая модель позволяет учитывать корреспонденцию, структуру и мощность струй региональных пассажиропотоков, определить оптимальное

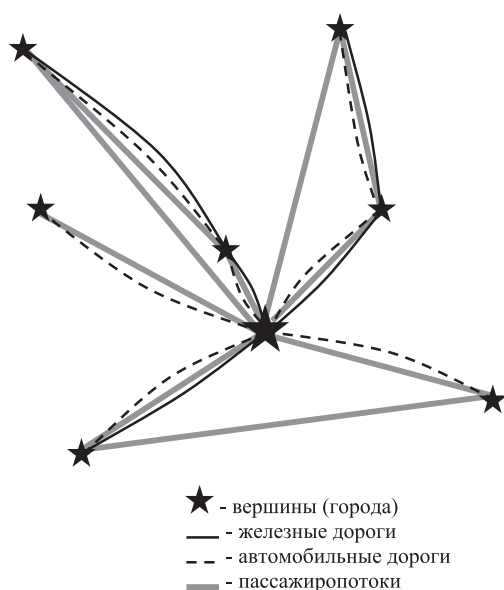


Рисунок 2 — Пример построения мультиграфа модели оптимизации маршрутной сети

распределение их между видами транспорта на оптимальной маршрутной сети между городами исследуемого региона. Полученные результаты лягут в основу новой системы освоения пригородных и местных пассажиропотоков Свердловской области.

3. Плотность пассажиропотока $\rho(t)$ существенно зависит от дня недели и времени года. Это обстоятельство необходимо учитывать при выполнении конкретных расчетов

4. В дальнейшем предполагается ввести в функцию $\rho(t)$ стохастическую добавку, поскольку пассажиропотоки обычно испытывают случайные колебания.

5. Автотранспортные перевозки отличаются большей адаптивностью, и при составлении расписания движения можно отправлять транспорт через фиксированные интервалы времени. Потребное число мест в автобусах определяется функцией $\Psi(t, \tau)$ при соответствующих значениях независимых переменных t, τ .

6. Авторами предложен концептуальный подход к решению рассмотренной проблемы, однако необходимо дальнейшее развитие предложенной методики, в частности совершенствование математической модели. Целесообразным здесь представляется использование аппарата SS-гиперсетей [10].

Литература

1. Васильев А.Г., Ковалев Р.Н. Методика расчета количества автобусов для обеспечения потребностей перевозки пассажиров междугородных рейсов // Транспорт Урала. 2011. № 1 (28). С. 19—24.
2. Казаков А.Л., Петров М.Б., Маслов А.М. Особенности формирования грузо- и вагонопотоков в региональной транспортной системе // Экономика региона. 2011. № 3. С. 184—193.
3. Пазойский Ю.О. Оптимизация параметров системы освоения пригородных пассажиропотоков в условиях мегаполиса : Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 339 с.
4. Пазойский Ю.О. Эффективность организации челночного тактового движения пригородных поездов // Транспорт России: проблемы и перспективы : труды Всерос. науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2007. С. 77.
5. Новоселова И.С. Совершенствование методов управления перевозками пассажиров в пригородном сообщении : Дис. ... канд. экон. наук. М., 2008. 158 с.
6. Муковнина Н.А. Организация пригородных перевозок с учетом размеров и структуры пассажиропотока : Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2008. 174 с.
7. Панова О.Н. План формирования пассажирских поездов при условии удовлетворения спроса на категории мест : Дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 173 с.
8. Уилсон Р. Введение в теорию графов : пер с англ. М. : Мир, 1977. 208 с.
9. Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. Лекции по теории графов. М. : УРСС, 2009. 392 с.
10. Попков В.К. Математические модели связности. Новосибирск : Изд. ИВМиМГ, 2006. 490 с.

References

1. Vasilyev A.G., Kovalev R.N. Metodika rascheta kolichstva avtobusov dlja obezpechenija potrebnostej perevozki passazhirov mezhdugorodnykh rejsov [Calculation method of required buses quantity to meet the needs in passenger intercity bus transportation] // Transport Urala. 2011. №1(28). S.19 – 24.
2. Kazakov A.L., Petrov M.B., Maslov A.M. Osobennosti formirovaniya gruzo- i vagonopotokov v regionalnoj transportnoj sisteme [Peculiarities of formation of cargo and car traffic volume in regional transport system] // Ekonomika regiona. 2011. № 3. S. 184 –193.
3. Pazoisky Yu. O. Optimizatsiya parametrov sistemy osvoeniya prigorodnykh passazhiropotokov v usloviyakh megapolisa [Optimization of development factors of commuter traffic flows in megalopolis]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.08. M., 2000. 339 s.: il.
4. Pazoisky Yu.O. Effektivnost organizatsii chelnochnogo taktovogo dvizheniya prigorodnykh poezdov [Management efficiency of shuttle clock traffic of commuter trains] // Transport Rossii: problemy i perspektivy: Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. M.: MIIT, 2007. S.77.
5. Novoselova I.S. Sovershenstvovanie metodov upravleniya perevozkami passazhirov v prigorodnom soobshchenii [Improvement of management methods of passenger traffic in commuter traffic]: dis. ...kand. ekonom. nauk: 08.00.05. M., 2008. 158 s.
6. Mukovkina N.A. Organizatsiya prigorodnykh perevozok s uchetom razmerov i struktury passazhiropotoka [Organisation of commuter traffic with regard to sizes and structure of traffic flow]: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.08. SPb, 2008. 174 s.
7. Panova O.N. Plan formirovaniya passazhirskikh poezdov pri uslovii udovletvoreniya sprosna na kategorii mest [Passenger trains' make up plan under condition of demand for accommodation class]: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.08. M., 2001. 173 s.
8. Uilson R. Vvedenie v teoriju grafov [Introduction to graphs' theory]: Per s angl. M.: Mir, 1977. 208 s.
9. Emelichev V.A., Melnikov O.I., Sarvanov V.I., Tyshkevich R.I. Leksii po teorii grafov [Lectures on graphs' theory]. M.: URSS, 2009. 392 s.
10. Popkov V.K. Matematicheskie modeli svyaznosti [Mathematical model of connectivity]. Novosibirsk: Izd. IVMiMG, 2006. 490 s.

УДК 629.421.3.083:004.9

Игорь Станиславович Цихалевский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Михаил Маликович Кудаяров, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ НА ПОЛИГОНЕ СВЕРДЛОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Igor S. Tsikhalevskiy, PhD, associate professor of 'Electrical haulage' chair of the Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia.
Mikhail M. Kudayarov, post-graduate student; 'Electrical haulage' chair of the Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Optimization Of Locomotives' Repair Process Organization On The Proving Ground Of Sverdlovsk Railway

Аннотация

Предложена математическая модель организации процесса эксплуатации и ремонта локомотивов, позволяющая получить оптимальное распределение объемов ремонтов локомотивов между ремонтными предприятиями и рассчитать экономический эффект данного распределения.

Оптимизация организации ремонта локомотивов относится к задачам, решаемым в теории массового обслуживания, т. е. в качестве заявок выступают локомотивы, нуждающиеся в проведении очередного планового ремонта, а в качестве исполнителей заявок — ремонтные предприятия. Создана программная оболочка для ЭВМ, позволяющая создавать программное описание модели средствами визуализации.

Ключевые слова: математическая модель, оптимизация, «очередь» локомотивов, организация ремонта, оптимальное распределение, программа ремонтов.

Annotation

It is offered the mathematical model of locomotives' exploitation and repair processes organization, which allows to receive the optimal locomotives' repair size distribution between repair enterprises and calculate the affordability of such distribution.

The optimization task of locomotives' repair process organization refers to tasks, being solved in the theory of queuing system, that is the locomotives, which need a regular scheduled repair are the bid and the repair enterprises are the executor. It is developed the program shell for PC, which allows to develop model program description by visualization tools.

Key words: mathematical model; optimization; locomotives' queue; repair process organization; optimal distribution; repair program.

В настоящее время произошло разделение функций эксплуатации локомотивов и их ремонтов между локомотивными депо, при этом на базе наиболее крупных депо выполняются ремонты локомотивов приписки не только этого депо, но и соседних, в функции которых остается только эксплуатация локомотивов.

Такой процесс требует тщательной проработки, так как увеличивается программа ремонтов в ремонтном депо, что может привести к образованию так называемой «очереди» локомотивов, ожидающих ремонтов в этом депо, кроме того, локомотив не выполняет своих функций во время пересылки из эксплуатационного депо в ремонтное. С другой стороны, слабая загрузка ремонтных предприятий приводит к простаиванию ремонтных позиций в ожидании поступления локомотивов. Все описанные ситуации в своем итоге приводят к увеличению расходов на содержание как локомотивов, так и технологического оборудования. Таким образом, необходимо решить проблему оптимального распределения программы ремонтов между ремонтными предприятиями на полигоне железной дороги.

Описанная выше задача относится к задачам, решаемым в теории массового обслуживания, т. е. в качестве заявок выступают локомотивы, нуждающиеся в проведении очередного планового ремонта, а в качестве исполнителей заявок — ремонтные предприятия. Однако решение этой задачи классическими методами теории марковских процессов не представляется возможным, поскольку на полигоне железной дороги может находиться несколько ремонтных предприятий и несколько эксплуатационных, причем каждое из эксплуатационных предприятий имеет возможность отправлять локомотивы на ремонт в каждое из ремонтных. Кроме того, использование марковских моделей подразумевает, что временные характеристики процесса подчинены экспоненциальному закону распределения, что не всегда соответствует действительности. В этом случае представляется целесообразным создать модель организации процесса экс-

платуации и ремонта локомотивов и провести имитационный эксперимент на ЭВМ, результатом которого будет оптимальное распределение объемов ремонтов локомотивов между ремонтными предприятиями. Для простоты описания условимся называть эксплуатационные предприятия как депо, а ремонтные предприятия как базы.

В первую очередь следует определиться с алгоритмом выбора базы для ремонта конкретного локомотива конкретного депо. Для его реализации воспользуемся генератором псевдослучайных чисел в интервале $(0,100)$, а для каждого депо установим доли $\alpha_1, \alpha_2, \dots$, которые будут определять возможность отправки локомотива на ту или иную базу (рис. 1). Сгенерировав на ЭВМ псевдослучайное число и сравнив его с границами $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$, определим направление отправки локомотива.

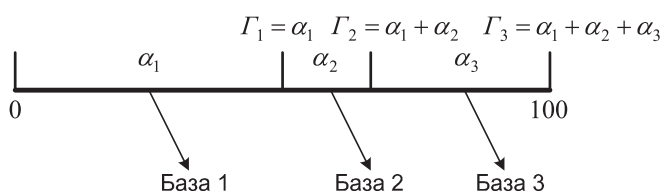


Рисунок 1 — Выбор базы для ремонта локомотива

Таким образом, решение задачи сведется к определению оптимальных значений $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ для каждого депо.

В качестве целевой функции для данной модели целесообразно использовать суммарные удельные потери от простоя локомотивов в ожидании ремонта $q_{\text{лок}}$, простоя ремонтных позиций в ожидании поступления локомотивов $q_{\text{рп}}$ и потери, вызванные транспортировкой локомотива из депо на базу $q_{\text{тр}}$

$$q_{\Sigma} = q_{\text{лок}} + q_{\text{рп}} + q_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Каждое слагаемое целевой функции можно определить, зная стоимости C_{i1} 1 часа и среднее время $\bar{T}_i$:

- простоя локомотивов в ожидании ремонта;
- простоя ремонтных позиций в ожидании поступления локомотивов;
- транспортировки локомотивов.

$$q_i = C_{i1} \cdot \bar{T}_i. \quad (2)$$

В свою очередь, среднее время простоя (или транспортировки) определяется как

$$\bar{T}_i = \frac{T_{\Sigma i}}{T_M}, \quad (3)$$

где T_{Σ} — суммарное время простоя (или транспортировки) за всю продолжительность периода моделирования T_M .

Логика функционирования системы заключается в следующем.

Для локомотивов приписного парка депо по достижении некоторой наработки (установленной распоряжением ОАО «РЖД» № 3р) необходимо проводить плановый ремонт. Очевидно, что с учетом неравномерности движения каждый ло-

комотив переходит в это состояние в произвольный момент времени t . Соответственно отправка локомотивов в ремонт происходит в порядке достижения ими этих состояний. Используя приведенный выше алгоритм выбора базы для проведения ремонта, определим направление отправки локомотива. Прибытие локомотива на базу происходит через некоторое время t , величина которого определяется как расстоянием между депо и базой, так и скоростью перемещения локомотива. По прибытии на базу возможны два варианта продолжения функционирования системы:

- ремонтные позиции базы свободны и простаивали в ожидании поступления локомотива, при этом восстановление локомотива начинается сразу после прибытия на базу, а суммарное время простоя ремонтных позиций $T_{\text{рп}}$ увеличится на разницу между временем поступления локомотива и временем освобождения ремонтной позиции от предыдущего локомотива;
- ремонтные позиции базы заняты восстановлением локомотивов, поступивших ранее, т. е. рассматриваемый локомотив будет ожидать освобождения ремонтных позиций, и на той из них, которая освободится раньше всех, начнется его восстановление, при этом суммарное время простоя локомотивов в ожидании освобождения ремонтных позиций $T_{\text{лок}}$ увеличится на разницу между временем освобождения ремонтной позиции и временем поступления локомотива.

После окончания восстановления локомотив отправляется в свое депо и прибывает туда через некоторое время транспортировки t . По прибытии в депо локомотив начинает эксплуатироваться и при достижении установленной наработки требуется выполнение очередного планового ремонта, и процесс повторяется.

Алгоритм функционирования рассматриваемой модели разберем на конкретном примере, в котором имеется 3 депо с приписным парком N_i и 2 базы, причем база 1 оснащена одной ремонтной позицией, а база 2 — двумя. Для обозначения моментов времени, связанных с событиями, происходящими с локомотивами, будем использовать обозначение $\tau_{a/b-c}$ где a — номер депо, b — номер локомотива, c — номер момента времени; аналогично для событий, связанных с базами: $\theta_{a/b-c}$ где a — номер базы, b — номер ремонтной позиции, c — номер момента времени. Продолжительность транспортировки обозначим $t_{a/b-c}$ где a — номер депо, b — номер локомотива, c — порядковый номер.

Рассматриваемый пример приведен на рис. 2.

Первое событие, возникающее в примере, соответствует 2-му локомотиву 3-го депо и заключается в необходимости проведения его ремонта. Момент времени его наступления соответствует $\tau_{3/2-1}$. Предположим, что на основании вышеизложенного алгоритма выбора базы для ремонта этого локомотива решено его выполнить на 2-й базе. С учетом времени транспортировки время прибытия на 2-ю базу составит $\theta_{2/1-1} = \tau_{3/2-1} + t_{3/2-1}$. К этому моменту на 2-й базе свободны обе ремонтные позиции, поэтому ремонт локомотива начинается сразу после его прибытия на 1-й ремонтной позиции. Окончание ремонта и соответственно освобождение 1-й ремонтной позиции происходит в момент времени $\theta_{2/1-1}$. Прибытие этого локомотива в депо происходит в момент времени

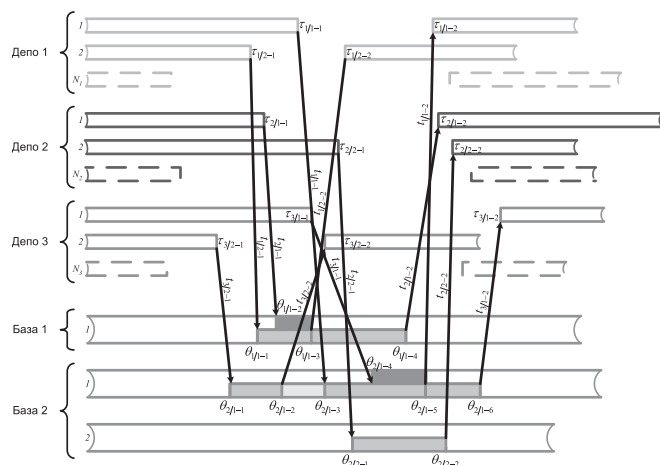


Рисунок 2 — Иллюстрация примера

$\tau_{3/2-2} = \theta_{2/1-2} + t_{3/2-2}$. Суммарное время транспортировки будет равно $T_{\Sigma \text{тр}} = T_{\Sigma \text{тр}} + (t_{3/2-1} + t_{3/2-2})$.

Для 2-го локомотива из 1-го депо необходимость проведения ремонта возникает в момент времени $\tau_{1/2-1}$. Предположим, что принято решение направить его на 1-ю базу, куда он прибудет в момент времени $\theta_{1/1-1} = \tau_{1/2-1} + t_{1/2-1}$. В этот момент времени 1-я ремонтная позиция на 1-й базе свободна, соответственно сразу после прибытия начинается ремонт этого локомотива, который закончится в момент времени $\theta_{1/1-3}$. Локомотив прибудет в свое депо в момент времени $\tau_{1/2-2} = \theta_{1/1-3} + t_{1/2-2}$. Суммарное время транспортировки будет равно $T_{\Sigma \text{тр}} = T_{\Sigma \text{тр}} + (t_{1/2-1} + t_{1/2-2})$.

В момент времени $\tau_{2/1-1}$ возникает необходимость проведения ремонта для 1-го локомотива 2-го депо, который решено отправить на 1-ю базу. Время прибытия на 1-ю базу $\theta_{1/1-2} = \tau_{2/1-1} + t_{2/1-1}$. В этот момент времени 1-я ремонтная позиция на 1-й базе занята, а поскольку на 1-й базе всего одна ремонтная позиция, то прибывший локомотив будет простаивать в ожидании ремонта до момента освобождения 1-й ремонтной позиции, которое произойдет в момент времени $\theta_{1/1-3}$. Суммарное время простоя локомотивов в ожидании ремонта станет равным $T_{\Sigma \text{лок}} = T_{\Sigma \text{лок}} + (\theta_{1/1-3} - \theta_{1/1-2})$. Ремонт этого локомотива закончится в момент времени $\theta_{1/1-4}$, и он вернется в свое депо к моменту времени $\tau_{2/1-2} = \theta_{1/1-4} + t_{2/1-2}$. Суммарное время транспортировки будет равно $T_{\Sigma \text{тр}} = T_{\Sigma \text{тр}} + (t_{2/1-1} + t_{2/1-2})$.

В момент времени $\tau_{1/1-1}$ необходима отправка на ремонт 1-го локомотива из 1-го депо. Принято решение отправить его на 2-ю базу, куда он прибудет в момент времени $\theta_{2/1-3} = \tau_{1/1-1} + t_{1/1-1}$. Поскольку $\theta_{2/1-3} > \theta_{2/1-2}$, то в этот момент свободны обе ремонтные позиции на 2-й базе. Восстановление этого локомотива начинается на 1-й ремонтной позиции, которая к этому моменту времени простаивала в ожидании поступления локомотива в течение $\theta_{2/1-3} - \theta_{2/1-2}$. Соответственно суммарное время простоя ремонтных позиций в ожидании поступления локомотивов составит $T_{\Sigma \text{прп}} = T_{\Sigma \text{прп}} + (\theta_{2/1-3} - \theta_{2/1-2})$. Окончание ремонта этого локомотива произойдет в момент времени $\theta_{2/1-5}$. Возвращение в депо произойдет в момент времени $\tau_{1/1-2} = \theta_{2/1-5} + t_{1/1-2}$. Суммарное время транспортировки составит $T_{\Sigma \text{тр}} = T_{\Sigma \text{тр}} + (t_{1/1-1} + t_{1/1-2})$.

Для 2-го локомотива 2-го депо необходимость проведения ремонта возникает в момент времени $\tau_{2/2-1}$. Принято решение выполнять восстановление этого локомотива на 2-й базе. С учетом времени транспортировки момент прибытия на 2-ю базу составит $\theta_{2/2-1} = \tau_{2/2-1} + t_{2/2-1}$. В этот момент времени 1-я ремонтная позиция на 2-й базе занята (на ней ремонтируется 1-й локомотив из 1-го депо), однако 2-я позиция свободна, поэтому его восстановление начинается сразу после прибытия и оканчивается в момент времени $\theta_{2/2-2}$. Прибытие локомотива в депо происходит в момент времени $\tau_{2/2-2} = \theta_{2/2-2} + t_{2/2-2}$. Суммарное время транспортировки составит $T_{\Sigma \text{тр}} = T_{\Sigma \text{тр}} + (t_{2/2-1} + t_{2/2-2})$.

В момент времени $\tau_{3/1-1}$ необходимо отправить в ремонт 1-й локомотив из 3-го депо. Принято решение проводить ремонт на 2-й базе. С учетом времени транспортировки время прибытия составит $\theta_{2/1-4} = \tau_{3/1-1} + t_{3/1-1}$. В этот момент времени на 2-й базе заняты обе ремонтные позиции (на 1-й ремонтируется 1-й локомотив из 1-го депо, на второй — 2-й локомотив из 2-го депо). Восстановление этого локомотива начнется не ранее освобождения одной из позиций. Так как $\theta_{2/1-5} < \theta_{2/2-2}$, то раньше освободится 1-я позиция. Суммарное время простоя локомотивов в ожидании ремонтов составит $T_{\Sigma \text{лок}} = T_{\Sigma \text{лок}} + (\theta_{2/1-5} - \theta_{2/1-4})$. Окончание ремонта произойдет в момент времени $\theta_{2/1-6}$, а прибытие в депо в момент времени $\tau_{3/1-2} = \theta_{2/1-6} + t_{3/1-2}$. Суммарное время транспортировки составит $T_{\Sigma \text{тр}} = T_{\Sigma \text{тр}} + (t_{3/1-1} + t_{3/1-2})$.

Рассмотренный пример наглядно поясняет алгоритм функционирования модели. Таким образом, накапливая времена простоя и транспортировки в пределах периода моделирования, имеется возможность определить оптимальные параметры модели. Продолжительность периода моделирования должна быть максимально большой (несколько десятков лет), чтобы имелась возможность накопить необходимую статистическую информацию. Однако существующие в настоящее время ЭВМ высокой вычислительной мощности позволяют выполнить моделирование за несколько минут. Поэтому примем продолжительность периода моделирования $T_M = 1000000 \text{ ч} = 114,16 \text{ года}$.

Поскольку для решения практических задач возможно построение модели с достаточно сложной топологией взаимосвязей между депо и базами, было принято решение создать для ЭВМ программную оболочку, позволяющую создавать программное описание модели средствами визуализации. В среде объектно-ориентированного программирования Borland Delphi 7 создан исполняемый файл NW.exe, запустив который перед пользователем откроется окно программы «Мастер проектов». Ввод информации о характеристиках проекта (модели) осуществляется по шагам с целью исключения ошибочного ввода данных.

На первом шаге (рис. 3) пользователь вводит имя проекта (любой набор символов с целью дальнейшей идентификации), количество эксплуатационных депо (целое число больше 0), количество ремонтных баз (целое число больше 0) и стоимость 1 ч простоя локомотивов, ремонтных позиций и 1 ч транспортировки локомотива (вещественные положительные числа).

Конечным результатом является построение диаграммы удельных затрат на ремонт (рис. 4) для различных ва-

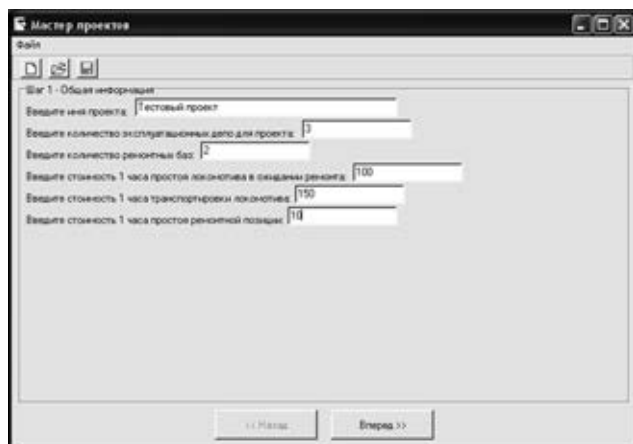


Рисунок 3 — Окно программы «Мастер проектов» на первом шаге ввода исходных данных

риантов передачи локомотивов из депо. Исходя из этого можно выбрать оптимальный вариант передачи локомотивов.

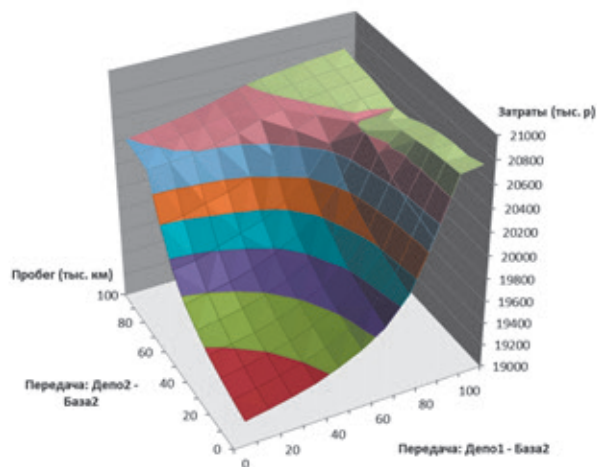


Рисунок 4 — Диаграмма удельных затрат

Подводя итоги, следует отметить, что данная программа позволяет рассчитать экономический эффект распределения локомотивов по ремонтным предприятиям.

Литература

1. Горский А.В., Воробьев А.А., Симакин И.В. и др. Технологические методы повышения показателей безотказности бандажей колесных пар // Безопасность движения поездов : труды IV науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2003. IV-26.
2. Горский А.В., Скребков А.В., Чигамбаев Т.О., Цихалевский И.С. Методика и алгоритм оптимального распределения локомотивов по ремонтным предприятиям // Транспорт Урала. 2008. Вып. 3 (18). С. 25—27.
3. Горский А.В., Воробьев А.А. Оптимизация системы ремонта локомотивов. М. : Транспорт, 1994. 208 с.
4. Жолквер Т.Д., Широков А.В. К вопросу об оптимальной комплектации технических устройств запасными частями // Надежность и контроль качества. 1976. № 9. С. 23—26.
5. Жакупов К.Б. Оптимизация параметров технологического процесса ремонта тягового подвижного состава (на примере электровагоноремонтного завода Атабасар Республики Казахстан) : Дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 130 с.

References

1. Gorskiy A.V., Vorobjev A.A., Simakin I.V. i dr. Tekhnologicheskie metody povysheniya pokazatelej bezotkaznosti bandazhej kolesnykh par [Technological methods of improving reliability indexes of wheel-pair treads] / Bezopasnost dvizhenija poezdov: Trudy IV nauchno-prakticheskoy konferentsii. M.: MIIT, 2003. IV-26.
2. Gorskiy A.V., Skrebkov A.V., Chigambaev T.O., Tsikhalevskij I.S. Metodika i algoritm optimalnogo raspredelenija lokomotivov po remontnym predpriyatijam [Methods and algorithm of locomotives' optimal distribution on repair enterprises] // Transport Urala. 2008. Vyp. 3(18). S. 25 – 27. ISSN 1815–9400.
3. Gorskiy A.V., Vorobjev A.A. Optimizatsija sistemy remonta lokomotivov. [Optimization of locomotives' repair system]. M.: Transport, 1994. 208 s.
4. Zholkver T.D., Shirokov A.V. K voprosu ob optimalnoj komplektatsii tekhnicheskikh ustroystv zapasnymi chastjami [To the question of optimal kit-ting of technical devices by spare parts] // Nadezhnost i kontrol kachestva. 1976. № 9. S. 23 – 26.
5. Zhakupov K.B. Optimizatsija parametrov tekhnologicheskogo protsessa remonta tjavogovo podvizhnogo sostava [Parameters' optimization of technological repair process of a motive power] (na primere elektrovozoremontnogo zavod Atabasar Respubliki Kazakhstan): diss. ... kand. tekhn. nauk. M.: 2008. 130 s.

УДК 629.4.015:629.423:621.313.33

Владислав Алексеевич Кучумов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ОАО «ВНИИЖТ»,
Роман Вилорьевич Мурзин, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Электропоезда» ОАО «ВНИИЖТ»,
Николай Станиславович Охотников, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИЖТ»,
Яков Бенцеонович Кудрявцев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИЖТ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕС ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС10 С РЕЛЬСАМИ

Vladislav A. Kuchumov, DSC, Professor, Senior staff scientist of VNIIZHT (Scientific-Research Institute of Railway Transport'),
Roman V. Murzin, PhD, head of the laboratory «Electric locomotives» of VNIIZHT,
Nikolay S. Okhotnikov, PhD, Senior staff scientist of VNIIZHT,
Yakov B. Kudryavtsev, PhD, key staff scientist of VNIIZHT

Experimental Identifying Traction Coefficient Of 2ES10 Electric Locomotive's Wheels With Rails

Аннотация

Впервые в отечественной практике экспериментально определен расчетный коэффициент сцепления грузового электропоезда постоянного тока с асинхронными тяговыми двигателями. Для этого проведены опытные поездки электропоезда 2ЭС10-001 с грузовыми поездами на перевальном участке Екатеринбург — Пермь Свердловской железной дороги с грузовыми поездами массой 6300, 7000 и 8000 т.

Методом усредненных сил тяги определены реализуемые электропоездом коэффициенты сцепления. При помощи их статистического анализа получена зависимость расчетного коэффициента сцепления электропоезда по сцеплению от скорости движения в виде дробно-линейной функции, традиционно используемой в теории тяги поездов для описания зависимостей коэффициентов сцепления от скорости.

Полученная зависимость обеспечивает стабильное, с вероятностью около 95 %, ведение поезда и на 6—13% превышает аналогичную зависимость для электропоездов постоянного тока ВЛ10 и ВЛ11; на 3—7% превышает аналогичную зависимость для серийных электропоездов переменного тока ВЛ80 всех индексов в зоне скоростей движения выше 10 км/ч.

Ключевые слова: электропоезд, 2ЭС10, асинхронный привод, расчетный коэффициент сцепления.

Annotation

For the first time in scientific practice of the country it is experimentally identified the design traction coefficient of freight constant current electric locomotive with induction traction engine. In order to solve this pilot journeys of and electric locomotive 2ES10-001 with freight trains were made on the rail-and-water section Ekaterinburg — Perm of Sverdlovsk railway with freight trains with a mass of 6300, 7000 and 8000 ton

Traction coefficients of an electric locomotive are identified with use of the method of averaged driving force. With the help of their statistic analysis it is got the dependence of design traction coefficient of an electric locomotive by traction from speed in a form of homographic function, which is traditionally used in the theory of hauling operation to describe the dependence of traction coefficient from speed.

The received dependence provides stable (with a probability of 95%) train operation and exceeds similar dependence for electric locomotives VL 10 and VL11 by 6 — 13%; and for production alternating current electric locomotives VL80 of all indexes in a speed zone of more than 10 km/h by 3 — 7%.

Key words: electric locomotive, 2ES10, induction motor drive, design traction coefficient.

Улучшение тяговых свойств магистральных электропоездов является важной задачей отечественного локомотивостроения. Один из эффективных способов ее решения — это отказ от коллекторных и применение бесколлекторных (асинхронных и синхронных) тяговых электродвигателей (ТЭД). По данным отечественных и зарубежных исследований, применение более мощных бесколлекторных ТЭД позволяет повысить силу тяги электропоезда на 20—30% [1]. Статические полупроводниковые преобразователи, питающие бесколлекторные ТЭД, позволяют формировать тяговую характеристику электропоезда заданной формы и реализовать систему регулирования частоты тока [2, 3], искусственно создающую такую скорость проскальзывания колес относительно рельсов, при которой достигается наибольшее отношение реализуемой касательной силы тяги электропоезда, кН, к статической нагрузке от колес электропоезда на рельсы, кН (у электропоезда 2ЭС10 — 245,25 кН, у ВЛ11 — 225,63 кН), т. е. коэффициент тяги электропоезда.

В 2010-2011 гг. ООО «Уральские локомотивы» (Верхняя Пышма Свердловской обл.) в сотрудничестве с фирмой «Сименс» был разработан и построен опытный 8-осный грузовой электропоезд постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными ТЭД. На электропоезде применена блочная схема, при которой трехфазный асинхронный ТЭД, имеющий опорно-осевое подвешивание с одноступенчатым редуктором и передаточным числом 6,294, питается от отдельного автономного инвертора напряжения. Мощность ТЭД в продолжительном режиме 1050 кВт, а максимальная мощность в 15-минутном режиме, который на электропоезде 2ЭС10 называется бустерным, равна 1100 кВт.

Электропоезд успешно прошел приемочные и сертификационные испытания, при которых его заводская характеристика (рис. 1) была подтверждена, а электропоезд был принят к серийному производству. Двухсекционные 8-осные электропоезды 2ЭС10 приписаны к локомотивному депо Пермь-Сортировочная СвЖД и работают на линии Екатеринбург — Белезино.

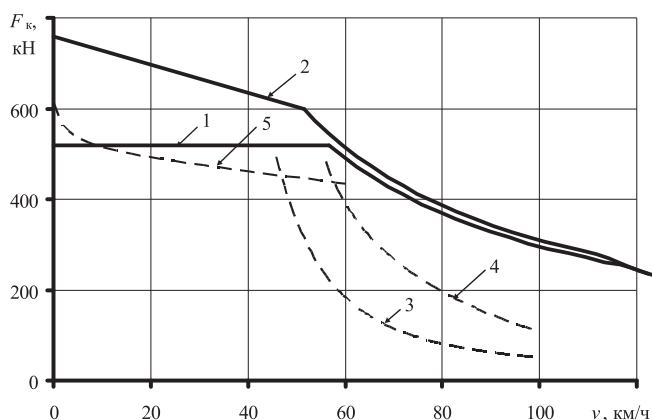


Рисунок 1 — Тяговая характеристика электровоза 2ЭС10 в продолжительном (1) и 15-минутном бустерном режиме (2); 8-осного электровоза ВЛ11 при параллельном соединении полным возбуждением (3) и 3-й ступени ослабления возбуждения (4); ограничение по сцеплению электровоза ВЛ11. Все характеристики приведены при диаметре бандажей колесных пар 1250 мм

Сила тяги 8-осного электровоза 2ЭС10 примерно на 10 % ниже, чем 12-осного электровоза ВЛ11. Однако на электровозе ВЛ11 при снижении скорости ниже расчетной машинист вынужден переходить с ходовой позиции регулирования напряжения на реостатные, что приводит к резкому снижению устойчивости электровоза к боксованию, дальнейшей потере скорости на подъеме и, как следствие, к остановке поезда.

На электровозе 2ЭС10 реализовано плавное бесконтактное регулирование напряжения на ТЭД без их перегруппировки и применения пусковых реостатов. Поэтому снижение скорости электровоза ниже расчетной не приводит к ухудшению его тягово-сцепных свойств и потере силы тяги. Таким образом, электровоз 2ЭС10 может вести поезд большей массы за счет снижения скорости движения по расчетному подъему. Это было использовано на участке Екатеринбург — Базеино, где для 8-осного электровоза 2ЭС10 была установлена норма массы поезда 7000 т, тогда как для 12-осного ВЛ11 на этом же участке она составляет 6300 т.

Для организации вождения тяжеловесных поездов крайне важно знать максимальную силу тяги, которую может надежно реализовать электровоз. Сила тяги современных грузовых электровозов, как правило, ограничена условиями сцепления [4]. Ограничение по сцеплению для электровозов ВЛ10 и ВЛ11 определено в [5]. Для электровозов 2ЭС10 сведения о коэффициенте сцепления до недавнего времени отсутствовали.

Для экспериментального определения расчетного коэффициента сцепления электровоза 2ЭС10 в эксплуатационных условиях впервые на отечественных железных дорогах были проведены опытные поездки электровоза 2ЭС10-001 в сцепе с динамометрическим вагоном-лабораторией на участке Екатеринбург-Сортировочный — Пермь-Сортировочная в соответствии с «Программой и методикой эксплуатационных испытаний по определению сцепных свойств электровоза 2ЭС10», согласованной с Департаментом технической политики ОАО «РЖД».

Участок имеет перевальный профиль. Крутизна наиболее тяжелых подъемов составляет в основном 7—9‰ с небольшими по протяженности участками (не более 0,5 км) крутизной до 10—11‰. Длина тяжелых подъемов — от 6 до 16 км. Состояние пути во время проведения испытаний оценивалось как хорошее. Согласно [5], уменьшение расчетного коэффициента сцепления на расчетных и труднейших подъемах допускается в кривых радиусом менее 500 м. Так как на рассматриваемом участке такие кривые практически отсутствуют, их влияние на коэффициент сцепления не учитывалось.

Поездки проводились в зимнее время (ноябрь—декабрь 2011 г.). Температура воздуха составляла минус 2—7°C, во время одной из поездок температура снизилась до минус 17—20°C. Примерно половина поездок проводилась в снегопад, временами сильный. Массы поездов составляли 6300, 7000 и 8000 т.

Измерения проводились в соответствии с «Типовой методикой испытаний электровозов» ТМ 39-05-11 Испытательного Центра ОАО «ВНИИЖТ». Суммарная погрешность измерений в соответствии с данной методикой не превышала: по каналу скорости — 0,5%; силы тяги — 1,5%; токов и напряжения — 1,0%. Запись данных измерительно-вычислительным комплексом осуществлялась с частотой 20 кГц.

На время проведения опытных поездок электровоз был оборудован измерительно-вычислительным комплексом, осуществляющим непрерывную запись значений частот вращения 8-и колесных пар электровоза и колесной пары вагона-лаборатории, вращающих моментов на валах ТЭД, токов и напряжений ТЭД, входных токов преобразователей, напряжения в контактной сети, а также сигналов подачи песка.

Сила тяги электровоза определялась исходя из значений вращающих моментов ТЭД, получаемых из системы управления электровозом, которая ранее была откалибрована компанией «Сименс» на стенде. Точность показаний бортового компьютера также была проверена ОАО «ВНИИЖТ» во время проведения приемочных испытаний электровоза. Во время опытных поездок сила тяги, определяемая по вращающим моментам на валах ТЭД, контролировалась по показаниям калиброванной динамометрической автосцепки вагона-лаборатории.

Скольжение всех 8 колесных пар электровоза определялось путем сравнения их частот вращения с частотой вращения колесной пары вагона-лаборатории. В процессе движения тормоза тележки вагона, на которой расположен датчик, были отключены, чтобы данная колесная пара вращалась без скольжения.

Определение отношения силы тяги электровоза, кН, ограниченной по сцеплению колес с рельсами, к статической нагрузке от колес электровоза на рельсы, кН, т. е. коэффициента сцепления электровоза, осуществлялось по осциллограммам методом усредненных сил тяги. При этом величина статической нагрузки от колес на рельсы была принята равной 245,25 кН, что соответствует служебной массе данного электровоза с 2/3 запаса песка.

Принцип метода усредненных сил тяги [6] заключается в следующем. В процессе движения по расчетному подъему

колесные пары (КП) электровоза, как правило, находятся в режиме прерывистого боксования. При этом силы тяги каждой КП изменяются. В результате максимальная масса поезда, которую возможно провезти по расчетному подъему, определяется усредненной силой тяги на ободе колеса $F_{к\text{ ср}}$ реализованной электровозом за время t_p движения по подъему и определяемой в виде

$$F_{к\text{ ср}} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} F_k dt.$$

При обработке результатов испытаний временные диаграммы токов (сил тяги) ТЭД за время движения по расчетному подъему разделяют на отдельные интервалы при различных значениях силы тяги и определяют средние значения сил тяги ТЭД. Из них складывается усредненное значение силы тяги электровоза на данном участке $F_{к\text{ ср}}$ при скорости v на участке. Каждой опытной точке соответствует движение на отрезке пути длиной от 100 м и больше в зависимости от условий поездки. На основании данных ряда опытных поездов получают область точек в координатах $F_{к\text{ ср}}$, v , по которым производится определение ограничения силы тяги электровоза по сцеплению.

Расчет ограничения коэффициента тяги электровоза 23С10 по сцеплению осуществлялся следующим образом. Из полученных в опытных поездках осциллограмм отбирались участки, на которых заданная сила тяги электровоза была максимально возможной в соответствии с тяговой характеристикой бустерного режима (см. рис. 1). Данные участки, как правило, соответствовали движению по расчетному подъему или троганию с места на подъеме. Для увеличения количества и продолжительности участков работы электровоза с максимальной силой тяги и увеличения количества точек в области низких скоростей движения во время опытных поездов специально производились остановки и трогания поезда с места на расчетном подъеме.

Далее отобранные участки осциллограмм разделялись на равные по длительности интервалы (10 с). На каждом интервале определялось среднее значение реализованной силы тяги и коэффициента тяги электровоза.

Полученные при помощи метода усредненных сил тяги значения коэффициентов сцепления электровоза приведены на рис. 2. В качестве режима с максимальной силой тяги был принят бустерный 15-минутный режим. Кроме тяговой характеристики указанного режима, на рис. 2 приведена зависимость коэффициента сцепления от скорости движения, приведенная в [5] для электровозов постоянного тока ВЛ10, ВЛ11.

Из рис. 2 видно, что значительная часть точек лежит непосредственно на характеристиках электровоза. Эти точки соответствуют устойчивой реализации силы тяги без избыточного проскальзывания.

На электровозе 23С10 противобоксовочная защита (ПБЗ) интегрирована в систему управления. При срыве сцепления ПБЗ автоматически снижает силу тяги боксующих осей до тех пор, пока скольжение не уменьшится до допустимого уровня. При необходимости под колесные пары боксующей секции подается песок. Далее ПБЗ поддерживает скольжение на уровне, приблизительно соответствующем миниму-

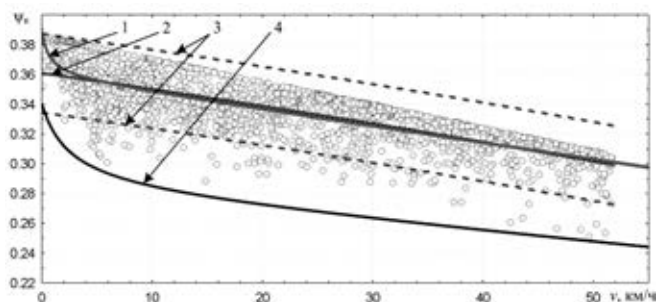


Рисунок 2 — Статистическая обработка экспериментальных данных: 1 — кривая регрессии в виде дробно-линейной функции; 2 — кривая регрессии в виде квадратичной функции; 3 — границы доверительного интервала кривой регрессии в виде квадратичной функции при 95 %-й доверительной вероятности; 4 — зависимость коэффициента сцепления электровозов ВЛ10, ВЛ11 от скорости

му сцепления при данных условиях. Следовательно, точки, лежащие ниже тяговой характеристики, соответствуют режиму работы электровоза на пределе сцепления. При этом ПБЗ постоянно контролирует возможность повышения силы тяги до заданной величины, и если такое увеличение не вызывает повторного срыва сцепления, то сила тяги восстанавливается.

Таким образом, полученные экспериментальные точки характеризуют максимальный коэффициент тяги, ограниченный условиями сцепления (точки, лежащие ниже тяговой характеристики) и максимальной заданной силой тяги электровоза (точки, лежащие на характеристике), и учитывают влияние ПБЗ электровоза на реализуемую силу тяги.

Полученный при опытных поездках файл экспериментальных результатов послужил основой для установления итоговых регрессионных зависимостей расчетного коэффициента сцепления [6] от скорости движения v . Для анализа экспериментальных данных были применены общие методы множественной регрессии [7, 8]. Использование статистических характеристик указанных методов и современного программного пакета STATISTICA [9] позволило резко сократить продолжительность разработки и отладки программ и повысило их надежность.

При статистическом анализе использовались два вида функций: квадратичная

$$\psi_k = a + bv + cv^2 \quad (1)$$

и дробно-линейная

$$\psi_k = a + \frac{b}{c + dv} - ev, \quad (2)$$

взятая из [5] и традиционно применяемая в теории тяги поездов для описания зависимостей коэффициентов сцепления различных электровозов от скорости.

Кривая регрессии (см. рис. 2) вида (1) снабжена значением двухстороннего доверительного интервала при 95%-й доверительной вероятности, соответствующей числу и расположению рассматриваемых точек. Из рис. 2 видно, что для диапазона скоростей 5—52 км/ч кривые, полученные по формулам (1) и (2), практически одинаковы. В диапазоне

скоростей 0—5 км/ч целесообразно использовать кривую по формуле (2).

Величина и значимость регрессии в целом по F-критерию Фишера и индивидуальных коэффициентов регрессии по t-критерию Стьюдента во всех рассматриваемых случаях характеризуются высоким уровнем значимости, а гипотеза о равенстве нулю коэффициентов регрессии отклоняется.

Вместе с тем значение критерия детерминации $R^2 = 0,60$ показывает, что доля регрессии в общем разбросе экспериментальных точек сравнительно невелика. Таким образом, полученная регрессия удовлетворительно описывает исходные экспериментальные данные.

Также по критерию Пирсона производилась проверка соответствия распределения коэффициентов тяги нормальному закону, который отклоняется с уровнем значимости $\alpha = 0,05$. Отклонение от нормального закона распределения объясняется тем, что верхняя граница облака экспериментальных точек искусственно ограничена тяговой характеристикой электровоза.

Таким образом, статистическая обработка экспериментальных точек позволила получить аппроксимационные зависимости коэффициента сцепления от скорости. На рис. 2 приведены средние зависимости, однако использование усредненных зависимостей нежелательно, поскольку вероятность стабильной реализации силы тяги электровозом при этом составляет около 50%. Поэтому для практического использования рекомендуются значения коэффициента сцепления, уменьшенные относительно среднего значения экспериментальных точек на удвоенную величину их среднеквадратического отклонения 2σ [10].

Таким образом, итоговая экспериментальная зависимость (рис. 3) расчетного коэффициента сцепления электровоза 2ЭС10 от скорости v описывается формулой

$$\psi_k = 0,33 + \frac{0,5}{16,54 + 22,49v} - 0,001v$$

и позволяет определить коэффициент сцепления, обеспечивающий стабильное, с вероятностью около 95%, ведение поезда.

Для сравнения на рис. 4 приведены зависимости, установленные в [5] для электровозов постоянного тока ВЛ10 и ВЛ11 (кривая 2), переменного тока ВЛ80 различных индексов (кривая 3) и полученная для электровоза 2ЭС10 после обработки экспериментальных данных (кривая 1).

Как видно из рис. 4, полученная для электровоза 2ЭС10 зависимость располагается на 6—13% выше зависимости, установленной в [5] для электровозов постоянного тока ВЛ10 и ВЛ11. Такое увеличение силы тяги обусловлено серьезными отличиями в конструкции и принципах регулирования электровозов с асинхронными и коллекторными ТЭД. В качестве основных причин повышения силы тяги по сцеплению по сравнению с электровозами с коллекторными ТЭД можно назвать:

- плавное регулирование силы тяги, позволяющее более полно реализовать потенциальный коэффициент сцепления и исключать срывы в буксование, вызванные скачками силы тяги при ступенчатом пуске;

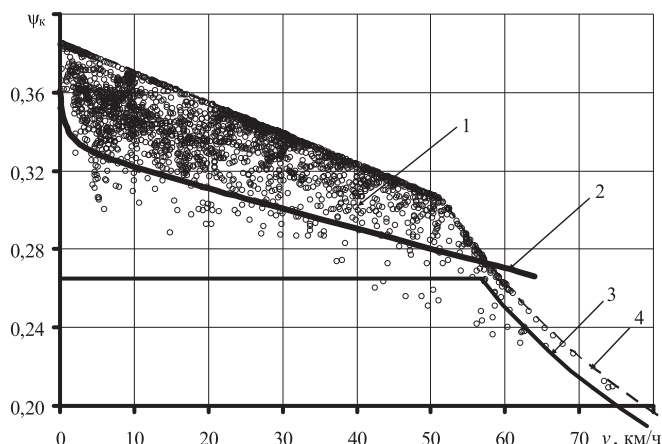


Рисунок 3 — Коэффициенты сцепления электровоза 2ЭС10, полученные методом усредненных сил тяги: 1 — экспериментальные значения коэффициента сцепления; 2 — зависимость расчетного коэффициента сцепления электровоза 2ЭС10 от скорости; 3 — тяговая характеристика электровоза 2ЭС10 в продолжительном режиме; 4 — тяговая характеристика электровоза 2ЭС10 в 15-минутном бустерном режиме

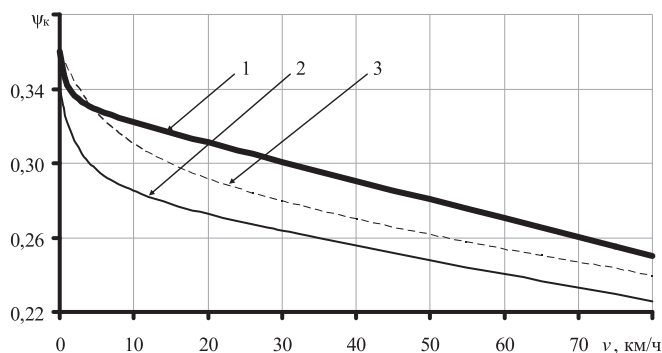


Рисунок 4 — Зависимости расчетных коэффициентов сцепления от скорости движения: 1 — электровоз 2ЭС10; 2 — электровоз постоянного тока; 3 — электровоз переменного тока

- более совершенную систему ПБЗ с поосным регулированием силы тяги и алгоритмом поиска максимума сцепления;
- увеличенное по сравнению с электровозами предыдущих серий передаточное отношение тягового редуктора (с 3,83 у электровозов постоянного и 4,19 переменного тока до 6,294), что привело к значительному повышению инерционности тягового привода и соответственно к повышению устойчивости к буксованию.

Также некоторое улучшение тяговых свойств электровоза 2ЭС10 может быть обусловлено более совершенной конструкцией механической части.

Таким образом, результаты испытаний показали эффективность технических решений, реализованных на электровозе 2ЭС10, и подтвердили, что применение современной микропроцессорной системы управления совместно с асинхронным тяговым приводом позволило повысить расчетный коэффициент сцепления электровоза на 6—13%.

Закключение.

Статистическая обработка результатов опытных поездов 8-осного электровоза 23С10-001 в ноябре-декабре 2011 г. с грузовыми поездами массой 6300—8000 т на перевальном участке Екатеринбург-Сортировочный — Пермь-Сортировочная позволила установить зависимость расчетного коэффициента сцепления электровоза по сцеплению от скорости v движения в виде

$$\psi_k = 0,33 + \frac{0,5}{16,54 + 22,49v} - 0,001v.$$

Полученная зависимость обеспечивает стабильное, с вероятностью около 95%, ведение поезда и на 6—13 % превышает аналогичную зависимость для электровозов ВЛ10, ВЛ11 постоянного тока с коллекторными ТЭД последовательного возбуж-

дения со ступенчатым регулированием напряжения и имеющих передаточное число 3,83; она на 3—7% превышает аналогичную зависимость для серийных электровозов переменного тока ВЛ80 всех индексов в зоне скоростей движения выше 10 км/ч.

Таким образом, современные технические решения, примененные на электровозе 23С10, показали свою эффективность.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников ОАО «ВНИИЖТ» кандидатов технических наук Н.Б. Никифорову, Н.Н. Широченко, инженеров И.В. Ванина, О.В. Виноградову, Н.Г. Капанадзе и начальника динамометрического вагон-лаборатории А.В. Фомичева за самоотверженный труд по разработке и оборудованию измерительных цепей, а также обработке экспериментального материала, представленного в настоящей статье.

Литература

1. Зевенхофен Н. Экспериментальные исследования сцепления движущей оси с приводом трехфазного тока // Железные дороги мира. 1981. № 12. С. 7—18.
2. Мейер Б. Локомотивы с высокими тягово-сцепными качествами и регулируемым крипом // Железные дороги мира. 1989. № 5. С. 18—25.
3. Schreiber R.. Оптимальное использование сил сцепления электровозами с трехфазным приводом и крутизна характеристик сцепления // Железные дороги мира. 1996. № 2. С. 42—47.
4. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Озеров М.И. Теория электрической тяги / под ред. И.П. Исаева. М.: Транспорт, 1995. 294 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. 287 с.
6. Некрасов О.А., Лисицын А.Л., Мугинштейн Л.А., Рахманинов В.И. Режимы работы магистральных электровозов / под ред. О.А. Некрасова. М.: Транспорт, 1983. 231 с.
7. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Статистика, 1958. 464 с.
9. Боровиков В.П., Боровиков И.П. STATISTICA — статистический анализ и обработка данных в среде WINDOWS. М.: Филинь, 1997. 608 с.
10. Исаев И.П. Случайные факторы и коэффициенты сцепления. М.: Транспорт, 1970. 184 с.

References

1. Zevenhofen N. Eksperimentalnye issledovaniya stsepleniya dvizhushchej osi s privodom trekhfaznogo toka [Experimental research of pressure axis coupling with three-phase current drive] // Zheleznye dorogi mira. 1981. №12. S. 7 – 18.
2. Mejer B. Lokomotivy s vysokimi tjavovo-stsepnymi kachestvami i reguliruемым kripom [Locomotives with high towing coupling characteristics and regulated creep] // Zheleznye dorogi mira. 1989. №5. S. 18 – 25.
3. Schreiber R.. Optimalnoe ispolzovanie sil stseplenija elektrovozami s trehfaznym privodom i krutizna kharakteristik stseplenija [Optimal use of coupling forces by the locomotives with three-phase drive and coupling slope of curve] // Zheleznye dorogi mira. 1996. №2. S. 42 – 47.
4. Rozenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N., Ozerov M.I. Teoriya elektricheskoy tjagi [Theory of electric haulage] / Pod red. I.P. Isaeva. M.: Transport. 1995. 294 s.
5. Pravila tjavovykh raschetov dlja poezdnoj raboty. [Rules of haulage calculations for train service] – M.: Transport. 1985. –287 s.
6. Nekrasov O.A., Lisitsyn A.L., Muginshtejn L.A., Rakhmaninov V.I.. Rezhimy raboty magistralnykh elektrovozov [Operation modes of mainline electric locomotives] / Pod red. O.A. Nekrasova. M.: Transport. 1983. 231 s.
7. Drejper N., Smit G. Prikladnoj regressionnyj analiz. [Applied regression analysis] Per. s angl. M.: Statistika. 1973. 392 s.
8. Venttsel E.S. Teorija verojatnostej. [Probability theory] M.: Statistika. 1958. 464 s.
9. Borovikov V.P., Borovikov I.P.. STATISTICA – statisticheskij analiz i obrabotka dannykh v srede WINDOWS. [Statistics – statistic analysis and data processing in WINDOWS environment] M.: Informatsionno-izdatelskij dom «Filin». 1997. 608 s.
10. Isaev I. P.. Sluchajnye faktory i koefeffitsienty stseplenija. [Random factors and traction coefficients] M.: Transport. 1970. 184 s.

УДК 629.4.067.4

Виталий Романович Асадченко, доктор технических наук, профессор кафедры электрической тяги Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ СКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ПРОТИВОЮЗНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Vitaly R. Asadchenko. DSc, prof., "Electric traction" department, USURT

Development Of Mathematical Model Of Braking System Of High-Speed Rolling Stock With Antiskid Slip Regulators

Аннотация

Рассмотрены проблемы высокоскоростного движения, связанные с эффективной реализацией свойств сцепления колес подвижного состава с рельсами при одно- и двухточечном контактах. Приведена методика разработки математической модели процессов торможения подвижного состава с противоюзными устройствами. Даны результаты исследования на ней различных алгоритмов противоюзных устройств по шести параметрам и четырем участкам пути с различным уровнем сцепления. Показано, что учет в модели второго контактного пятна существенно влияет на результаты работы модели и должен учитываться при создании противоюзных электронных устройств.

Ключевые слова: тормозная эффективность, тормозная сила, сила сцепления, характеристика сцепления, процессы скольжения колеса.

Annotation

The problems of high-speed traffic connected with effective realization of wheels' grip of rolling stock with single-point and two-point contacts are described in the article. The method of mathematical model development of rolling stock braking with antiskid devices is given. The research results of different algorithms of antiskid devices by six parameters and four lines with different grip level. It is showed that calculation in a model of second contact spot mainly influences on the results of model work and should be taken into consideration for creation of antiskid electronic devices.

Key words: braking efficiency, braking force, factors, grip properties, wheels' slip.

Поскольку кинетическая энергия движущегося поезда возрастает в квадратичной зависимости от скорости движения, то для ее быстрого перевода в тепловую и механическую требуются мощные и эффективные тормозные средства. Пара трения колодка — колесо при скоростях выше 160 км/ч не успевает отводить возникающее тепло даже при чугунных тормозных колодках. Это вызывает необходимость ее переноса с поверхности катания колеса на специальные, хорошо вентилируемые диски, устанавливаемые на оси колесной пары или непосредственно на каждом колесе. Такая конструкция создает ряд преимуществ, связанных с возможностью выбора хороших фрикционных характеристик пары трения, ее необходимой площади, быстрого отвода тепла, а также применения простейшей рычажной передачи с минимальными потерями и высоким быстродействием.

Одним из недостатков дискового тормоза является отсутствие очистки поверхности катания колеса, что на загрязненных рельсах приводит к уменьшению силы сцепления практически в два раза и повышает вероятность возникновения юза. Попытки использовать для этих целей специальные очищающие колодки или создавать колодочно-дисковые тормоза не дали положительного результата. В первом случае не достигались необходимые усилия, а во втором механическая часть тормоза существенно усложнялась, что снижало ее эффективность и создавало трудности в обслуживании.

В связи с этим перспективным является применение быстродействующих электронных противоюзных устройств с такими алгоритмами работы, которые позволяют управлять движением колесных пар, создавая их небольшое проскальзывание и самоочистение без существенных повреждений. При этом каждый вагон поезда, оборудованный указанными устройствами, «просушивает» рельсы и улучшает условия торможения для последующего вагона.

Особенно актуально применение таких регуляторов управления скольжением в связи с широким использованием в последние годы лубрикатов для снижения износа гребней колес и рельсов, хотя и не дающих гарантий отсутствия используемой смазки на поверхности катания.

Для анализа действия противоюзных регуляторов была усовершенствована математическая модель процессов адап-

тивной реализации сцепления при торможении, предложенная ранее [1].

Математическая модель подвижной единицы реализуется на основании дифференциальных уравнений процессов поступательного (без вертикальной динамики) движения транспортного средства и его колесной пары [2], усовершенствованных в соответствии со схемой сил, представленных на рис. 1,

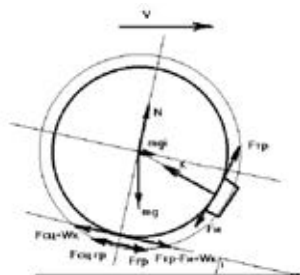


Рисунок 1 — Схема сил, действующих на затормаживаемое колесо, с учетом бокового контактного пятна

$$\left. \begin{aligned} m \cdot \frac{dV}{dt} &= -F_{сц} \pm mg \cdot i - W_o \\ J \cdot \frac{d\omega_k}{dt} &= F_{сц} \cdot R - \sum_{i=1}^n K\phi_k \cdot R - W_k \pm F_{сп} (R + \Delta) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\frac{dV}{dt}$ — ускорение транспортного средства;

W_o — основное сопротивление движению от воздушной среды;

i — сопротивление движению от уклона пути;

J — момент инерции колесной пары;

$\frac{d\omega_k}{dt}$ — угловое ускорение колесной пары;

$F_{сц}$ — сила сцепления колесной пары с рельсами;

$\sum_{i=1}^n K\phi_k$ — сила трения от суммы сил нажатий колодок на колесную пару;

W_k — сопротивление движению колесной пары;

$F_{сп}$ — сила трения, возникающая на гребне колеса при появлении второго контакта.

Сила трения $F_{сп}$ находится по формуле [2]

$$F_{сп} = \frac{2}{\pi} \cdot \phi_{ск} \cdot q_0 \cdot \arctg\left(\frac{\lambda}{\lambda^*}\right), \quad (2)$$

где $\phi_{ск}$ — коэффициент трения-скольжения колес по рельсам;
 q_0 — нагрузка, передаваемая от колесной пары на рельсы;
 λ — коэффициент аппроксимации зависимости крива.

При учете в математической модели второго контактного пятна делается допущение, что колесная пара движется по синусоидальной траектории, периодически контактируя гребнем с рельсами. Поэтому нагрузка на втором контактном пятне изменяется также по синусоидальному закону. Кроме того, нужно учитывать, что на части траектории колесной пары $F_{сп}=0$ и второго контакта нет.

Таким образом, при нормальном качении колеса по рельсу при входе во второй контакт в нем возникает сила трения $F(\lambda_1)$ и появляется момент $M_2 = F \cdot R$, который является тормозным и препятствует вращению колесной пары (см. рис. 2).

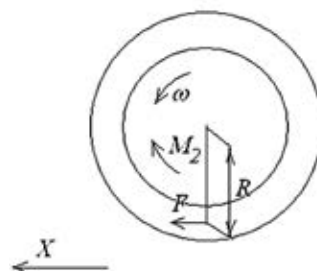


Рисунок 2 — К определению знака момента

Тогда при величине проскальзывания на поверхности катания $\lambda_2 = 0,021$ величина проскальзывания на боковом пятне, найденная по формуле (2), равняется нулю

$$\lambda_1 = 1 - \frac{(1 - 0,021)}{0,979} = 1 - \frac{0,979}{0,979} = 0. \quad (3)$$

При дальнейшем увеличении проскальзывания на поверхности катания меняется знак λ_1 с отрицательного на положительный, а значит, направление силы трения и момента. Момент M_2 уже будет препятствовать заклиниванию колесной пары. Например, $\lambda_2 = 0,04$. Тогда

$$\lambda_1 = 1 - \frac{(1 - 0,04)}{0,979} = 0,02.$$

Кроме того, предварительный анализ разрабатываемой модели показал нецелесообразность полного аналогового моделирования всех интересующих устройств и процессов. Упрощенное стремление к полноте общего или математического описания в подобных случаях, как отмечают специалисты, зачастую приводит к понижению реальной точности и практической ценности результата. Поэтому при моделировании некоторых блоков использован широко применяемый метод функционального кибернетического моделирования — когда внутреннее содержание системы считается неизвестным, а описание ее поведения определяется двумя группами параметров — входа и выхода.

Структурная схема этой математической модели приведена на рис. 3 и состоит из следующих основных блоков: распределитель из электропневматических клапанов I, тормозной цилиндр — II, рычажная передача — III, колодка — колесо — IV, колесо — рельс — V, противоюзное устройство — VI, подвижная единица — VI/01/.

Противоюзное устройство 15 формирует сигнал (—1 — сброс давления в тормозных цилиндрах; 0 — перекрыша; 1 — наполнение тормозных цилиндров), который подается к распределителю 1 и далее к электропневматическим клапанам 2, 3. В зависимости от сигнала элементы схемы 2 и 3 рассчитывают давление в тормозных цилиндрах. Сумматор формирует полученный результат и в соответствии с параметрами рычажной передачи в блоке 5 вычисляется нажатие на колодку.

Касательная сила трения тормозных колодок в модели (см. рис. 1) представлена в виде нелинейной функции 6, на вход которой подается сила нажатия колодки и скорость вращения исследуемой колесной пары.

Сила сцепления колеса с рельсом определяется элементом 8 как функция двух переменных: скорости подвижного состава и скольжения колесной пары.

Сумматорами 8 и 11 выявляются результирующие силы, действующие соответственно на колесную пару и подвижной состав и создающие ускорения, обратно пропорциональные их массам, которые после интегрирования в блоках 9 и 12 определяют скорости колеса и подвижного состава. Сумматор 10 определяет скольжение колесной пары.

В связи с тем что сила трения колодки о колесо зависит от окружной скорости колеса и сила сцепления колеса с рельсом определяется зависимостью скорости скольжения, в схеме математической модели используются обратные связи. Модель противоюзного устройства VI может быть различной в зависимости от схемных решений, алгоритма его действия и ряда других факторов.

Важным этапом совершенствования математической модели является оценка ее достоверности. Она базировалась на экспериментальных данных, полученных автором во время натурных поездных испытаний электронного противоюзного устройства на опытном полигоне Майкоп — Белореченская. Сравнение процессов, реализованных при многочисленных опытных испытаниях и полученных на математической моде-

ли, показали их хорошую сходимость, что позволяет проводить дальнейшие исследования с помощью последней.

Для исследований были выбраны три алгоритма действия противоюзных устройств:

- инерционно-механическое: на вход блока VI подается ускорение колесной пары, в случае превышения им $3-4 \text{ м/с}^2$ происходит сброс давления в тормозных цилиндрах до нуля, а затем его восстановление до прежнего уровня;
- слежение за скольжением: удерживает заданное скольжение колесной пары периодическим наполнением и сбросом давления в тормозных цилиндрах — на вход блока VI подается величина скольжения колесной пары;
- адаптивное устройство для автоматического управления колесными тормозами по условиям сцепления, авторская свидетельства на которое принадлежит Асадченко В.Р.: на входе блока VI — скорости подвижной единицы, колесных пар и давление в тормозном цилиндре.

На выходе противоюзного устройства сигнал для распределителя 1 о сбросе, перекрыше или наполнении тормозного цилиндра.

Суммарная результирующая задержка τ от момента возникновения сигнала о регулировании давления до изменения давления в тормозных цилиндрах учитывается соответствующим блоком запаздывания в обработке сигнала управления. При необходимости она может приниматься различной, в зависимости от процесса впуска или выпуска воздуха.

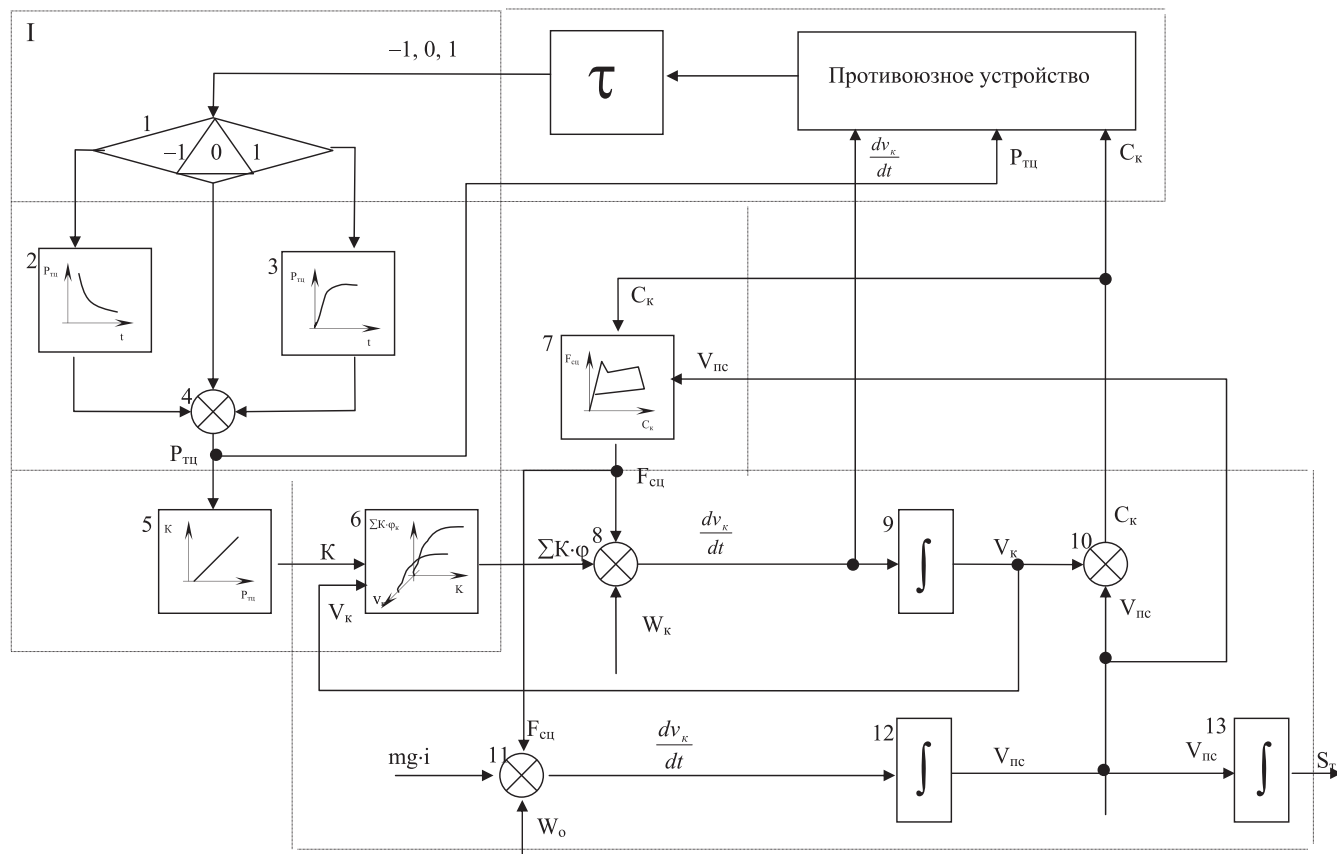


Рисунок 3 — Функциональная схема математической модели процесса торможения

При учете в математической модели второго контактного пятна принимается, что колесная пара движется по синусоидальной траектории, периодически контактируя гребнем с рельсами. Поэтому нагрузка на втором контактном пятне изменяется также по синусоиде. Кроме того, нужно учитывать, что на части траектории колесной пары $F_{\text{от}} = 0$ второго контакта нет.

С помощью математической модели выполняются тормозные расчеты для пассажирского поезда, изменяя алгоритмы работы противоюзного устройства при прочих равных условиях. Для анализа работы противоюзного устройства имитируется движение поезда по участку с разным характером изменения сцепления:

1) замасленный участок — в процессе торможения встречается отрезок пути 200 м с пониженным на 40% коэффициентом сцепления колеса с рельсом;

2) однородный участок — сцепление колеса с рельсом на участке меняется в соответствии с зависимостью

$$\psi_0 = (0,17 - 0,00015 \cdot (q_0 - 50)) \cdot \left(\frac{V + 180}{2,6 \cdot V + 180} \right), \quad (4)$$

где ψ_0 — максимально—реализуемый коэффициент сцепления колеса с рельсом;

q_0 — нагрузка, передаваемая от колесной пары на рельсы, кН;

3) участок с сухими чистыми рельсами — коэффициент сцепления колеса с рельсом выше среднего, описываемого зависимостью (4), на 5—10%;

4) неоднородный участок — коэффициент сцепления колеса с рельсом с течением времени изменяется на $\pm 15\%$ от среднего, описываемого зависимостью (4).

На рис. 4 представлен процесс торможения пассажирского вагона (изменение скорости состава, скорости вращения первой и четвертой по ходу колесных пар электровоза ЧС7 и давления в тормозных цилиндрах с течением времени), оборудованного противоюзным устройством инерционно-механического действия, на замасленном участке пути. В момент срыва сцепления (см. рис. 4) замедление колесной пары достигает 3—4 м/с², происходит срабатывание инерционно-механического противоюзного устройства — сброс давления в тормозных цилиндрах практически до нуля. Затем через некоторый момент времени уровень давления в тормозных цилиндрах восстанавливается, но, так как сцепление колеса с рельсом по-прежнему низко, снова происходит срыв сцепления, и антиблокировочный цикл повторяется до момента восстановления сцепления колеса с рельсом. Также из рис. 4 видно, что при следовании по замасленному отрезку пути уменьшается замедление поезда. При скорости поезда менее 30 км/ч сила трения колеса о чугунную колодку начинает резко возрастать, что приводит к блокированию колеса и соответственно вызывает срабатывание противоюзного устройства.

Инерционно-механическое противоюзное устройство обеспечивает защиту колесных пар от юза и блокирования. Запас силы сцепления колеса с рельсом по условиям входа колесных пар в юз в процессе торможения в этом случае обеспечивается меньшим нажатием колодки на колесо.

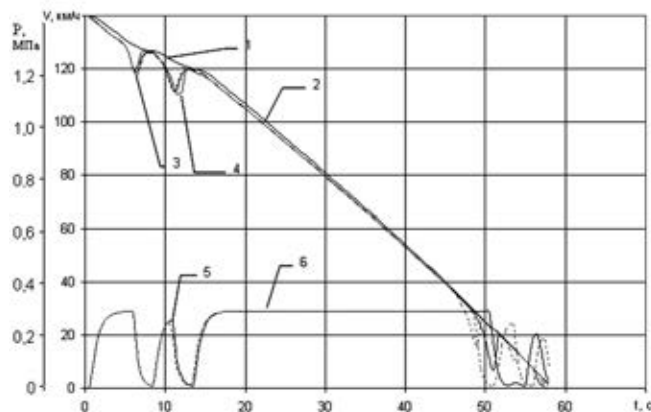


Рисунок 4 — Процесс торможения пассажирского поезда на замасленном участке (инерционно-механическое противоюзное устройство): 1 — скорость поезда; 2 — скорость 1-й колесной пары электровоза; 3 — скорость 4-й колесной пары локомотива; 4 — скорость 1-й колесной пары вагона; 5 — давление в тормозном цилиндре 1-й колесной пары электровоза; 6 — давление в тормозном цилиндре 4-й колесной пары

На рис. 5 представлен процесс торможения пассажирского состава, оборудованного противоюзным устройством, следящим за скольжением на замасленном участке. Как видно из рисунка, колесная пара преднамеренно вводится в юз (скольжение колесной пары $C_k > 2\%$), после чего происходит сбрасывание давления в тормозных цилиндрах до момента выхода колесной пары из юза и дальнейшее повторение этого цикла. Прохождение замасленного отрезка ничем не отличается от прохождения чистого участка: поезд идет в режиме периодического перетормаживания, выявляя границу сцепления колеса с рельсом. Как видно из рис. 5, глубина сброса давления в тормозных цилиндрах имеет большую амплитуду — 50% от максимального давления, что обуславливает большой расход воздуха, а броски силы сцепления колеса с рельсом вызывают неудовлетворительную продольную динамику подвижного состава. Тем не менее «пилообразный» алгоритм первых микропроцессорных противоюзных устройств позволяет более полно реализовать имеющееся на участке сцепление по отношению к подвижному составу, оборудованному пневмомеханическими противоюзными устройствами, сокращая тормозной путь в среднем на 5—10%.

На рис. 6 представлен процесс торможения пассажирского состава, оборудованного адаптивным противоюзным устройством, на замасленном участке пути, а на рис. 7 для этого же процесса торможения — изменение силы сцепления колеса с рельсом и силы трения колодки о колесо для четвертой по ходу колесной пары. При наезде на замасленный участок адаптивное противоюзное устройство выявляет уровень давления в тормозных цилиндрах, при котором колесная пара не входит в юз, и все колесные пары идут в режиме реализации максимального сцепления на данном отрезке пути. Далее видно, что четвертая по ходу колесная пара первой секции электровоза ЧС7 определяет новый порог сцепления, подстраивая под него давление в тормозных цилиндрах других колесных пар.

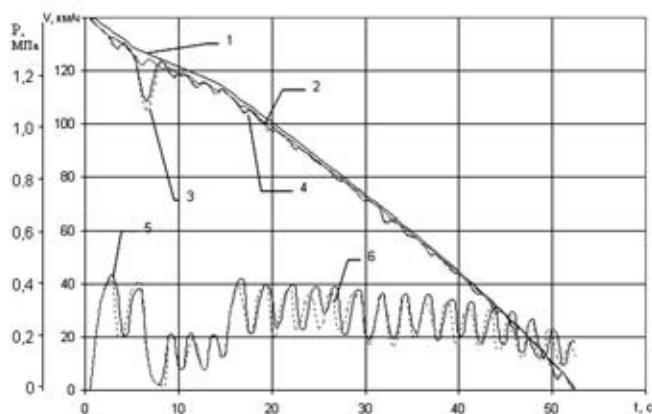


Рисунок 5 — Процесс торможения пассажирского поезда (алгоритм работы противоюзного устройства — слежение за скольжением): 1 — скорость поезда; 2 — скорость 1-й колесной пары электровоза; 3 — скорость 4-й колесной пары локомотива; 4 — скорость 1-й колесной пары вагона; 5 — давление в тормозном цилиндре 1-й колесной пары электровоза; 6 — давление в тормозном цилиндре 4-й колесной пары

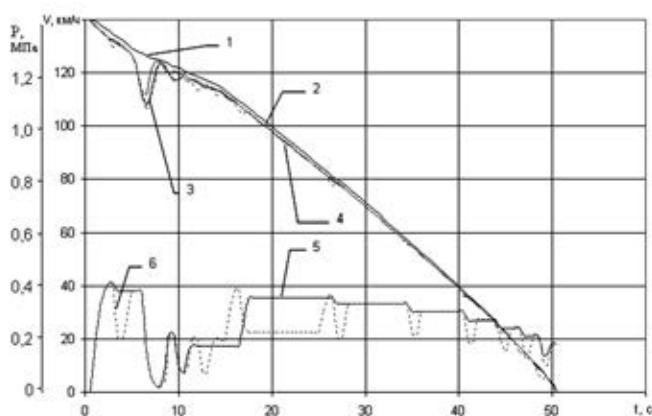


Рисунок 6 — Процесс торможения пассажирского поезда с адаптивным противоюзным устройством: 1 — скорость поезда; 2 — скорость 1-й колесной пары электровоза; 3 — скорость 4-й колесной пары локомотива; 4 — скорость 1-й колесной пары вагона; 5 — давление в тормозном цилиндре 1-й колесной пары электровоза; 6 — давление в тормозном цилиндре 4-й колесной пары

Реализованная модель процесса торможения поезда дает возможность скорректировать логику работы проектируемого адаптивного противоюзного устройства. Например, при прохождении участков с низким уровнем сцепления необходимо автоматически уменьшить время последующего обнаружения юза. Уменьшить частоту срабатывания адаптивного противоюзного устройства можно изменением величины ступени давления в зависимости от скорости подвижного состава и типа используемых тормозных колодок.

Результаты тормозных расчетов на участках с различным характером изменения сцепления колеса с рельсом сведены в табл. 1.

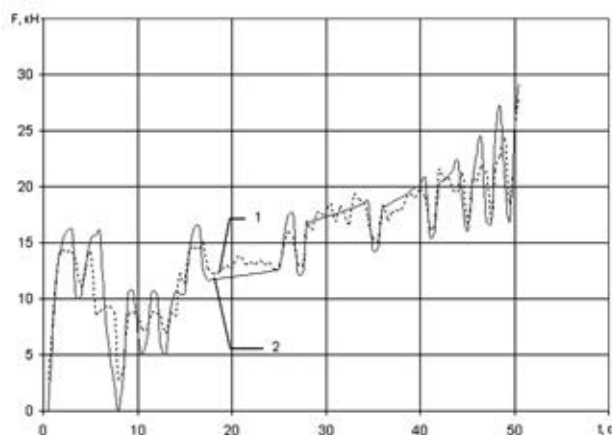


Рисунок 7 — Изменение сил сцепления колеса с рельсом и трения колодки о колесо (адаптивное противоюзное устройство): 1 — сила сцепления колеса с рельсом; 2 — сила трения колодки о колесо

Таблица 1 — Обобщенные результаты тормозных расчетов

Исследуемый параметр	Алгоритм работы противоюзного устройства	Тип участка			
		замас- ленный	одно- родный	чистый, сухой	неодно- родный
Время торможе- ния, с	инерционно-мех.	58	53	53	54
	слежение за скольжением	53	49	45	49
	адаптивный	51	46	44	46
Длина тормозного пути, м	инерционно-мех.	1280	1100	1090	1120
	слежение за скольжением	1170	1030	970	1040
	адаптивный	1130	980	930	980
Тормозной коэф- фициент	инерционно-мех.	0,7	0,78	0,8	0,76
	слежение за скольжением	0,77	0,86	0,97	0,87
	адаптивный	0,82	0,97	1,07	0,95
Средняя величина скольжения	инерционно-мех.	0,05	0,04	0,02	0,03
	слежение за скольжением	0,05	0,04	0,04	0,03
	адаптивный	0,03	0,03	0,03	0,02
Частота срабаты- вания противоюз- ного устройства	инерционно-мех.	4,8	2,9	2,6	3,2
	слежение за скольжением	23,8	23	21,2	23,3
	адаптивный	12	8,9	9,3	11,3

Приведенные исследования показывают, что адаптивный алгоритм работы противоюзного устройства позволяет не только на участке с повышенным коэффициентом сцепления колеса с рельсом сокращать тормозной путь на 15% по сравнению с инерционно-механическим противоюзным устройством, но и на замасленном участке реализовывать максимальный коэффициент сцепления, уменьшая тормозной путь на 12%. На участке со случайным изменением коэффициента сцепления колеса с рельсом тормозной путь сокращается на 13%.

При выборе алгоритма работы противоюзного устройства необходимо учитывать множество факторов, один из которых — возможность оборудования противоюзным устройством не

только локомотива, но и подвижного состава в целом. Так как электровоз ЧС7 оборудован индивидуальным тормозным приводом на каждую колесную пару, сбрасывающими клапанами, на борту локомотива и пассажирского подвижного состава имеются постоянные источники электрического питания, то есть все предпосылки для создания тормозной системы с использованием адаптивных противоюзных устройств.

Результаты расчетов на однородном участке с учетом и без учета второго контактного пятна для поезда, оборудованного противоюзными устройствами с адаптивным алгоритмом, представлены в табл. 2.

Таблица 2 — Результаты тормозных расчетов для пассажирского поезда, оборудованного противоюзными устройствами с адаптивным алгоритмом

Исследуемый параметр	С учетом 2-го контактного пятна	Без учета 2-го контактного пятна
Время торможения, с	47	48
Длина тормозного пути, м	980	1020
Средняя величина скольжения	0,024	0,043
Среднее нажатие колодки на колесо, кН	207	197
Тормозной коэффициент	1,00	0,95
Частота срабатывания противоюзного устройства	8,3	8,6

Результаты расчетов для поезда, оборудованного противоюзными устройствами, работающими по алгоритму «Слежение за скольжением», представлены в табл. 3.

Что касается различий в имитируемых математической моделью процессах торможения без учета и с учетом второго контактного пятна, то они хорошо иллюстрируются с помощью табл. 2 и 3.

Таблица 3 — Результаты расчетов для поезда, оборудованного противоюзными устройствами, работающими по алгоритму «Слежение за скольжением» [3, 4]

Исследуемый параметр	С учетом 2-го контактного пятна	Без учета 2-го контактного пятна
Время торможения, с	46	55
Длина тормозного пути, м	970	1150
Средняя величина скольжения	0,028	0,067
Среднее нажатие колодок на колесную пару, кН	214	153,3
Тормозной коэффициент	1,03	0,74
Частота срабатывания противоюзного устройства	14,8	20,7

Таким образом, в математических моделях процессов взаимодействия колес и рельсов при торможении необходимо учитывать:

- влияние бокового контактного пятна, в том числе и на прямых участках пути;
- неоднозначность сил, возникающих во втором пятне, при различных уровнях скольжения колесных пар;
- динамические усилия при ударе гребня колеса о рельс, существенно влияющие на процесс вращения колесной пары и выбор эффективного алгоритма действия современных противоюзных устройств.

Литература

1. Асадченко В.Р. Математическое моделирование процессов адаптивной реализации сцепления при торможении и ее оценка / УЭМИИТ. Свердловск, 1989. 18 с.
2. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. 479 с.
3. Асадченко В.Р. Закономерности, алгоритмы и критерии реализации свойств сцепления при торможении подвижного состава // Вестник инженеров электромехаников железнодорожного транспорта. Самара, 2003. Вып. 1. С. 307—311.
4. Асадченко В.Р. Оценка использования сцепления колес с рельсами и эффективные режимы работы тормозных устройств // Вестник ВНИИЖТ. 1988. № 8. С. 42—44.

References

1. Asadchenko V.R. Matematicheskoe modelirovanie protsessov adaptivnoj realizatsii stseplenija pri tormozhenii, i ee otsenka [Mathematical simulation of adaptive realization processes of grip during braking and its estimation]. / Ural. elektromekhan. in-t inzh. zh.-d. transp. Sverdlovsk, 1989. 18 s. il. 4. Bibliogr. 5 nazv. Dep. v CNIITJeI MPS, 1989, № 5013.
2. Shakhunyants G.M. Zheleznodorozhny put [Railway track]. M.: Transport, 1987. 479s.
3. Asadchenko V.R. Zakonomernosti, algoritmy i kriterii realizatsii svoystv stseplenija pri tormozhenii podvizhnogo sostava [Regularities, algorithms and realization criteria of grip properties during rolling stock braking] // Vestnik inzhenerov elektromekhanikov zheleznodorozhnogo transporta. Samara. 2003. Vyp. 1. S. 307 – 311.
4. Asadchenko V.R. Otsenka ispolzovaniya stseplenija koles s relsami i effektivnye rezhimy raboty tormoznykh ustroystv [Estimation of wheels' grip and effective operation modes of lock gear]// Vestnik VNIIZhT. 1988. № 8. S. 42 – 44.

УДК 625.11

Геннадий Львович Аккерман, доктор технических наук, профессор 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

ТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ И НЕПОЗНАННОСТЬ СРЕДЫ

Gennady L. Akkerman, DSc, professor, «Railway Construction and Railway Track» Department, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia,

Sergey G. Akkerman, PhD, associate professor, «Railway Construction and Railway Track» Department, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Transport Network And Environment Non-Detection

Аннотация

Основой расхождения между реальными и прогнозируемыми параметрами транспортной системы является непознаваемость среды или ее малая информированность, которая проявляется через ее неопределенность.

Неопределенность среды ведет к необходимости увеличения ресурса и количества рассматриваемых вариантов при создании и управлении транспортной сетью (или ее инфраструктурой).

Предположение, что показатели вариантов звена транспортной сети (например, координаты ее пространственного положения) — случайные величины, позволяет рассматривать систему некоторых параметров этого звена как характеристику дискретного канала без помех. Максимальное значение энтропии (меры неопределенности) в этом случае определяется через информационную емкость канала.

С увеличением энтропии возникают затраты на реализацию этого звена. Например, с увеличением энтропии на 12% затраты увеличиваются на 20%.

На конкретном примере отмечается увеличение числа вариантов при возрастании неопределенности среды. Указывается путь преодоления неопределенности.

Ключевые слова: транспортная сеть, энтропия, неопределенность среды, информационная емкость канала.

Annotation

Divergence of actual and predictable parameters of transport system is the environment non-detection or its little information awareness that is shown in its ambiguity.

Environment ambiguity leads to necessity of resource increase and number of examined variants during creation and management of transport network (or its infrastructure).

Assumption that variant factors of transport network link (for example, coordinates of its space disposition) are random quantities let to view the system of some parameters of this link as a characteristic of discrete channel without disturbances. Maximal value of entropy (ambiguity measures) is detected by information capacity of a channel.

With entropy increase expenses for link realization also appear. For instance, with entropy increase for 12% the expenses increase for 20%.

By this example the increase of variants' number during environment ambiguity increase is showed. The way of ambiguity overcome is considered.

Key words: transport network, entropy, environment non-detection, information channel capacity.

1. Природа неопределенности при создании транспортной сети

Непознаваемость или неинформированность среды проявляется через ее неопределенность. Неопределенность ведет к необходимости проработки большого числа вариантов транспортной сети и значительному увеличению потребного ресурса. Данная статья посвящена оценке влияния степени неинформированности на указанные факторы.

Транспортная сеть — сложная техническая система, при создании которой необходимо учитывать иерархичность, структурность, динамичность. При функционировании ряд сооружений сети развивается согласно требуемой пропускной и провозной способности.

Мощность сети зависит от параметров постоянных устройств, технического оснащения и организации движения, которые закладываются при ее создании.

Транспортная сеть рассчитана часто на неограниченный срок эксплуатации. Нередко проектирование и начало функционирования сети почти всегда отделяет длительный отрезок времени.

Поэтому на практике часто возникает несоответствие прогнозируемых и «эксплуатационных» значений некоторых параметров.

Происходит это по следующим причинам:

- некоторая часть используемой информации при создании системы недостоверна и не всегда обладает требуемой полнотой;
- сложность прогнозирования условий работы и характеристик составляющих сети;
- ограничения на ресурсы;
- многовариантность.

Следствием этого является неопределенность, которая возникает при игнорировании случайных и вероятных составляющих, возникающих вследствие непознания (неинформированности) среды.

При проектировании желательно учитывать [1, 2]:

- неопределенность при оценке внешней среды — ее агрегирования и дезагрегирования; неполноту информации;
- неопределенность критерия оптимальности. Это объясняется нечеткостью стоимостных показателей, учетом в

критерии составляющей, определяющей экономический риск;

- неопределенность, вытекающую из прогнозного характера результатов решений. Основой ее может быть поздняя реализация проекта, неточная оценка этапов развития транспортной сети [3] и т. п.

Одним из важнейших принципов создания транспортной сети является вариантность рассматриваемых решений.

Каждый вариант можно рассматривать как случайную величину x из множества значений X . Если $C(x)$ — «стоимость» (под «стоимостью» можно понимать строительные, эксплуатационные, приведенные расходы или любые другие ресурсы), то чем больше $C(x_i)$, тем вариант дальше «удален» от оптимального, т. е. вероятность «появления» варианта зависит от $C(x_i)$. В каждом конкретном случае $C(x_i) \leq A$, где A — предельная величина критерия.

Тогда система $\{X, C(x), A\}$ характеризует дискретный канал без помех.

Максимальное значение энтропии в данном аспекте как мера непознанности (неинформированности) среды определяется через информационную емкость канала или его пропускную способность.

Свободная энергия $F(t)$ [4]

$$F(t) = -t \cdot \ln \sum_{i=1}^M e^{-\frac{C_i}{t}}, \quad (1)$$

где t — параметр;

M — количество вариантов.

Сделаем некоторые преобразования, получим

$$F(t) = C_1 - t \cdot \ln \left(1 + \sum_{i=2}^M e^{-\frac{C_i - C_1}{t}} \right). \quad (2)$$

Энтропия

$$H(t) = -\frac{dF}{dt};$$

$$H(t) = \ln \left(1 + \sum_{i=2}^M e^{-\frac{C_i - C_1}{t}} \right) + \frac{\sum_{i=2}^M (C_i - C_1) \cdot e^{-\frac{C_i - C_1}{t}}}{t \cdot \left(1 + \sum_{i=2}^M e^{-\frac{C_i - C_1}{t}} \right)}. \quad (3)$$

Средние потери (риск) $R(t)$ определяются как

$$R(t) = F(t) + t \cdot H(t);$$

$$R(t) = \frac{\sum_{i=2}^M (C_i - C_1) \cdot e^{-\frac{C_i - C_1}{t}}}{1 + \sum_{i=2}^M e^{-\frac{C_i - C_1}{t}}}. \quad (4)$$

Если $t=0$, $H(t)=0$, тогда $R(t)=C_1$, а при $t=\infty$ $H(t)=\ln M$;

$$R(t) = \sum_{i=2}^M \frac{C_i}{M}.$$

С удалением от оптимального варианта (увеличением «риска» средних потерь) энтропия (количество информации) растет. Пример соотношения между энтропией и «стоимостью» конкретных вариантов приведен в табл. 1.

Таблица 1 — Зависимость энтропии от «стоимости» варианта

№ варианта	Стоимость варианта, ус. ед.	Стоимость варианта, %	Энтропия	Энтропия, %
1	28400	100	3,2	100
2	31200	110	3,5	109
3	34000	120	3,6	112,5

В каждом варианте значение величины $C(x)$ можно рассматривать как состоящую из двух частей: детерминированной (соответствующей проектным условиям) и вероятностной, учитывающей ситуацию, отличающуюся от проектной (природные условия: погода, геология и т. п., экономические условия, условия эксплуатации).

В этом случае, как предлагают некоторые авторы [5, 6], задача сравнения вариантов может быть решена с помощью теории игр.

Расхождения между фактическим и проектным решением тем меньше, чем меньше рассеивание случайной величины. При нормальном законе распределения с вероятностью 0,997 этот разброс укладывается, как правило, в 3σ , где σ — среднеквадратичное отклонение.

Прикидочные расчеты показывают, что среднеквадратичное отклонение составляет 37%, т. е. очень грубая прикидка дает предельное отклонение примерно 100%.

Иногда природа неопределенности объясняется не случайностью величин, а их расплывчатостью (нечеткостью), что позволяет использовать теорию расплывчатых множеств, которая изучает объекты с различной степенью принадлежности к рассматриваемой группе, характеризующейся функцией принадлежности, принимающей значения от 0 до 1.

Неопределенность растет при увеличении вероятностной составляющей исходной информации. Поэтому при проектировании более правильно использовать не единственное детерминированное значение величины, а соответствующие пары чисел: величину и ее вероятность. Это усложняет методику расчета и подготовку исходных данных, однако использование компьютеров сглаживает появившиеся трудности. Ярким примером этого могут служить прогнозируемые грузопотоки на проектируемой или усиливаемой сети.

В практике проектирования грузопотоков (Γ) и соответствующее значение критерия $K=f(\Gamma)$ рассматриваются как детерминированные величины.

При их вероятностном представлении критерий K определяется как

$$K = \sum_{j=1}^n K_j P_j(\Gamma_j), \quad (5)$$

где n — количество вариантов грузопотоков и соответствующих им вероятностей.

Если за критерий сравнения вариантов принимаются приведенные годовые расходы (K_{np}), тогда формула

$$K_{np} = A + t_{ок} \Xi \quad (6)$$

преобразуется к виду

$$K_{np} = A + t_{ок} \sum_j \Xi_j P_j \quad (7)$$

где A — строительные расходы;

$t_{ок}$ — срок окупаемости;

Ξ_j — эксплуатационные расходы при j -м варианте грузопотока;

P_j — вероятность j -го варианта грузопотока.

В общем виде в условиях неопределенности задача выбора оптимального варианта может быть сведена к следующей модели [1]: необходимо определить проектное решение при минимуме затрат и ожидаемом экономическом риске

$$\min F(\Pi(\theta), \mu D(\theta), x(\theta)) = \min \sum_i \sum_t [f_{it}(\Pi(\theta), \mu D_{it}(\theta), x_{it}(\theta))]$$

при ограничениях:

$$P_i \left(\sum_i \sum_t k_{it}(\theta) x_{it}(\theta) \leq D_j \right) \geq 1 - \varepsilon;$$

$$x_{it}(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \theta \in B; i \in \Xi \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

где f_{it} — функция приведенных затрат при i -м состоянии в t -м году;

θ — конкретная реализация из B заданного множества условий (исходные данные), учитывая «раскачку» исходных данных;

$\Pi(\theta)$ — вектор проектных параметров при в реализации исходных данных;

$\mu D_{it}(\theta)$ — экономический риск от принятия i -го состояния в t -м году при θ -й реализации исходных данных;

$x_{it}(\theta)$ — булева переменная при θ -й реализации исходных данных;

$d_{it}(\theta)$ — расход j -го ресурса при θ -й реализации исходных данных i -го состояния в t -м году;

d_j — объем j -го ресурса;

P_j — вероятность возможной реализации;

ε — порог значимости.

2. Неопределенность среды

Неопределенность положения звена транспортной сети и возможная оценка количества вариантов

Если транспортную сеть представить в виде последовательности звеньев, то каждое звено должно отвечать оптимальному решению, соответствующему предъявляемым требованиям.

Можно предположить, что вероятностные характеристики (закон распределения, математическое ожидание и др.) отклонения от оптимума в каждый момент с определенной долей условности считаются постоянными, не зависящими от рассматриваемого момента.

Такой процесс можно назвать стационарным случайным процессом. Тогда траектория развития сети с этой точки зрения — стационарный случайный процесс, где отклонение от оптимума в каждой точке есть величина вероятностная, математическое ожидание которой не зависит от рассматриваемой точки звена сети.

Кстати, изменение (траектория) действительного грузопотока на любом участке сети в зависимости от времени тоже случайный стационарный процесс, в котором отклонения от ожидаемого (прогнозируемого) грузопотока — случайная ве-

личина. То же можно сказать про ряд эксплуатационных параметров.

Энтропия (H_T) отрезка длиной (T) определяется как

$$H_T = H_y T + 2h, \quad (8)$$

где T — длина отрезка (время, расстояние);

H_y — удельная энтропия;

h — энтропия конца отрезка.

Если концы отрезка фиксированы (например, железнодорожная линия между узлами сети),

$$2h = 0.$$

Если фиксирован один конец (например, кривая грузопотока в функции времени), то

$$H_T = H_y T + h. \quad (9)$$

Если $X_{K+1} = f(X_K, K)$, где X_K — случайная величина стационарного процесса, то такой процесс называется марковским.

Для стационарного марковского процесса

$$H_y = - \sum_X P_{CT}(X) \sum_{X^*} \pi(X, X^*) \ln \pi(X, X^*); \quad (10)$$

$$h = \frac{1}{2} \sum_{XX^*} P_{CT}(X) \pi(X, X^*) \ln \frac{\pi(X, X^*)}{P_{CT}(X^*)}, \quad (11)$$

где $P_{CT}(X)$ — стационарное распределение;

$\pi(X, X^*)$ — вероятности перехода.

Если по звену траектории с шагом ΔT разбить сечения, перпендикулярные направлению «трассы» в данной точке, на каждом сечении на расстоянии δ от оси направления траектории предыдущего сечения отложить точку, то можно определить вероятность попадания «трассы» в каждую из точек последующего сечения. В конкретном примере при разбиении железнодорожной трассы по карте М 1:25000 с шагом 0,5 км получены следующие вероятности попадания:

$$P(1) = 0,18; P(2) = 0,7; P(3) = 0,12.$$

Если рассматривать параметры трассы как стационарный марковский процесс, то для данного примера по формулам (10) — (11)

$$H_y = 1, h = 0,5.$$

На участке $T=10$ км по формуле (9)

$$H(T) = 10,5.$$

Зная энтропию, можно оценить максимальное количество возможных вариантов (для случая равновероятной организации)

$$M = e^H, \quad (12)$$

где e — основание натурального логарифма.

Для рассмотренного примера $M = e^{10,5} = 36300$.

Знание всех вариантов и соответствующих им критериев (С) дает полную информацию о положении звена транспортной системы.

Величины $P_{CT}(X)$ и $\pi(X, X^*)$ зависят от местных условий (экономики, рельефа, геологии, гидрографии и т. п.) и масштаба. Поэтому в каждом случае $H(T)$ будет иметь свое конкретное значение, которое определяется неоднородностью среды.

Оценка неоднородности природной среды при создании звеньев железнодорожной сети

Оценка будет производиться на примере укладки железнодорожной трассы на севере Западной Сибири.

Освоение нефтяных и газовых месторождений в северных районах Западной Сибири потребовало выполнения большого объема строительства железных и автомобильных дорог. Этот район характеризуется сравнительно спокойным рельефом, но значительной неоднородностью инженерно-геологических и гидрогеологических условий: сильной заболоченностью, заозерностью, наличием вечно-мерзлых грунтов и мерзлотных процессов и явлений, значительно развитыми поймами рек, ежегодно затапливаемыми паводковыми водами.

Колебания отметок по направлению трассы некоторых дорог в этих районах равняются 5 м и лишь на подходах к мостам составляют 105 м, а проектный уклон элементов профиля изменяется от 0 до 30‰, отношение строительной стоимости отдельных участков колеблется от 0,9 до 7,9.

Для выявления неоднородности территории район строительства делится на природно-территориальные комплексы, в пределах которых инженерно-геологические и гидрогеологические условия относительно однородны [10]. Выделение таких комплексов выполнялось на топографических и инженерно-геологических картах М 1:25000, фотопланах, дешифрированием аэрофотоснимков территории, с использованием материалов предшествующих изысканий.

Информация о природных условиях выбиралась таким образом, чтобы была возможность назначить рациональные конструкции земляного полотна и типы искусственных сооружений. Помимо этого решались вопросы определения объема и способов производства земляных работ, удельных показателей, соответствующих рассматриваемым природно-территориальным комплексам.

Определение стоимости показателей, как правило, сводилось к полному расчету затрат. Однако этот метод довольно трудоемок и на предварительной стадии часто не обеспечивается исходными данными, поэтому в некоторых случаях стоимостные показатели принимались по аналогии с подобными же объектами.

Ширина зоны трассирования при исследовании принималась равной либо эллипсу варьирования [2, 8], либо она определялась в зависимости от строительных условий и составляла обычно 1/3 длины трассы.

Трассирование дороги было выполнено по «стоимостной модели», представленной на карте областями удельной стоимости, границы которых либо совпадают с границами природно-территориальных комплексов [7], либо соответствуют ячейкам сетки цифровой модели местности.

Назовем пространство, в котором расположены области с одинаковой удельной стоимостью, фоном. При этом возможны два случая.

Фон для строительства менее благоприятен, чем области, создающие неоднородность. Примером этой модели может служить заболоченная местность с разбросанными по ней «островами» минеральных грунтов.

Для количественной оценки неоднородности территории в качестве критерия неопределенности воспользуемся понятием энтропии.

В нашем случае энтропию можно представить в виде

$$H = H_1 + H_2,$$

где H_1 — энтропия, характеризующая неопределенность (неоднородность) стоимостного рельефа;

H_2 — энтропия, характеризующая неопределенность (неравномерность) расположения областей удельной стоимости по площади.

В общем случае величина энтропии определяется по формуле

$$H = - \sum_{i=1}^{i=n} P(a_i) \log_2 P(a_i), \quad (13)$$

где $P(a_i)$ — вероятность прохождения трассы через a_i область;

n — количество областей.

Естественно, чем большую часть площади района займет a_i область, тем более вероятно прохождение линии через рассматриваемую область,

$$P(a_i) = \frac{S_i}{S}, \quad (14)$$

где S_i — площадь i -й области;

S — площадь района проектирования.

С учетом стоимости строительства в различных областях вероятность прохождения трассы через a_i область определяется как

$$P(a_i) = \frac{S_i C_i}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i C_i}, \quad (15)$$

где C_i — удельная стоимость строительства в a_i области.

Тогда энтропия стоимостного рельефа составит

$$H_1 = - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{S_i C_i}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i C_i} \log_2 \frac{S_i C_i}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i C_i}. \quad (16)$$

Для характеристики распределения областей удельной стоимости строительства по площади территории наложим на район транспортной сети сетку с шагом ΔX и ΔY так, чтобы ось X была параллельна выбранному звену, а ось Y — перпендикулярна ему. Теперь энтропия распределения центров областей по площади может быть представлена в виде суммы энтропий расположения центров областей по осям X и Y

$$H_2 = H_x + H_y. \quad (17)$$

Вероятность попадания центров областей в интервалы ΔX или ΔY составит:

$$P_x(a_i) = \frac{m_i}{n}; \quad (18)$$

$$P_y(a_i) = \frac{l_i}{n}, \quad (19)$$

где m_i и l_i — количество интервалов (ΔX ; ΔY), в которые попадает центр области a_i по осям X и Y соответственно.

Энтропия, характеризующая неравномерность распределения областей по площади, будет равна

$$H_2 = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{n} \log_2 \frac{m_i}{n} - \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{n} \log_2 \frac{l_i}{n}. \quad (20)$$

Энтропия по отдельным проектам в рассматриваемом районе изменяется от 2,5—3,8. С увеличением энтропии усложняется процесс выбора вариантов.

Уже отмечалось, что прогнозные величины (ресурсы, норма их расхода, стоимостные показатели и т. п.) могут отличаться от реальных. При прогнозировании оптимальных параметров сети целевая функция (K) должна принимать экстремальное значение (max или min). Тогда с учетом неопределенности рассматриваемых величин и ограничений на ресурсы задачу можно решать методами сетевой модели линейного программирования [9]:

$$K = \sum_{ij} \bar{c}_{ij} x_{ij} \rightarrow \min(\max);$$

$$\sum_{ij} \bar{c}_{ij}^{\gamma} x_{ij} \leq \bar{d}_{\gamma} - t_{py} \sqrt{\sum_{ij} (\sigma_{ij}^{\gamma})^2 x_{ij}^2 + \theta_{\gamma}^2};$$

$$0 \leq x \leq 1; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m},$$

где c_{ij} — минимизируемый ресурс, необходимый для осуществления перехода от параметра i к параметру j ;

$\bar{c}_{ij}$ — математическое ожидание случайной величины c_{ij} ;

x_{ij} — булево неизвестное, при $x_{ij}=0$ невозможен переход от параметра i к параметру j , при $x_{ij}=1$ такой переход возможен;

c_{ij}^{γ} — ресурс γ , необходимый для осуществления перехода от параметра i к параметру j ;

d_{γ} — ограничение на ресурс γ ;

$\bar{d}_{\gamma}$ — математическое ожидание величины d_{γ} ;

σ_{ij}^{γ} — дисперсия случайной величины c_{ij}^{γ} ;

θ_{γ} — дисперсия случайной величины b_{γ} ;

t_{py} — значение центрированной нормированной случайной величины в нормальном законе распределения, соответствующее заданному уровню вероятности P_{γ} соблюдения ограничения α_{γ} .

$$P \left[\sum_{ij} c_{ij}^{\gamma} x_{ij} \leq d_{\gamma} \right] \geq \alpha_{\gamma},$$

где P — символ вероятности.

$$t_p = \frac{\sum_{ij} \bar{c}_{ij} x_{ij} - \sum_{ij} \bar{c}_{ij} x_{ij}}{\sigma_{ij}}.$$

Применив кусочно-линейную аппроксимацию, задачу можно свести к линейному программированию. Обозначим

$$\xi_{\gamma} = t_{py} \sqrt{\sum_{ij} (\sigma_{ij}^{\gamma})^2 x_{ij}^2 + \theta_{\gamma}^2},$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} K &= \sum_{ij} \bar{c}_{ij} x_{ij} \rightarrow \min(\max) \\ \sum_{ij} \bar{c}_{ij}^{\gamma} x_{ij} &\leq \bar{K}_{\gamma} - \xi_{\gamma} \\ 0 \leq x &\leq 1; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Таким образом, учет неопределенности факторов приводит к уменьшению ресурса или для гарантированного достижения цели необходим дополнительный ресурс ξ_{γ} . С возрастанием уровня вероятности α_{γ} ; σ_{ij} ; θ_{γ} увеличивается и ξ_{γ} .

Значения $t_p = f(P)$, построенные согласно [10] по данным [2], показаны на рис. 1, а зависимость потребного ресурса ξ_{γ} (%) по данным [2] от вероятности P приведена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что учет неопределенности при создании транспортной сети с увеличением вероятности достижения поставленной цели ведет к значительному возрастанию потребного ресурса.

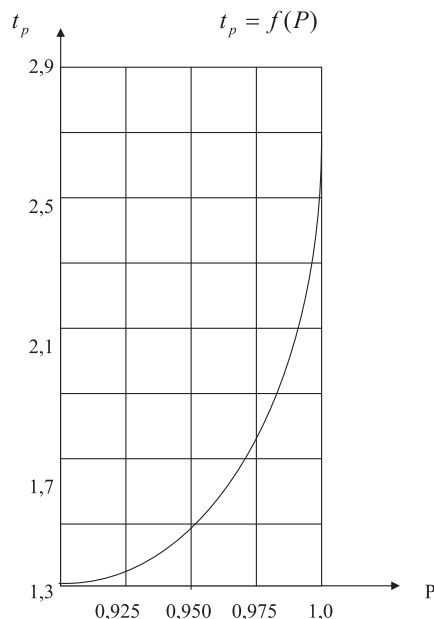


Рисунок 1 — Значения $t_p = f(P)$

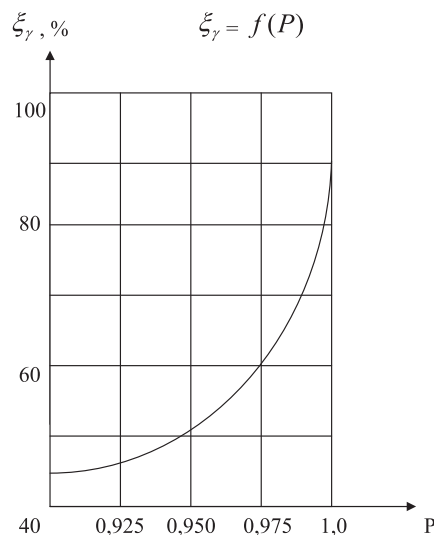


Рисунок 2 — Зависимость потребного ресурса ξ_{γ} (%) от вероятности P

Выводы

1. Непознанность среды (ее неинформированность) проявляется через неопределенность, мерой которой является энтропия.
2. С увеличением непознанности (уменьшением информативности) среды:

- резко возрастает количество рассматриваемых при создании или управлении транспортной сетью, вариантов;
- с увеличением вероятности достижения поставленной цели возрастает потребность в дополнительном ресурсе. Так, изменение вероятности достижения цели с 0,9 до 0,95 требует увеличения ресурса на 60%.

Литература

1. Бажан Л.И. Моделирование развития структуры парка автотранспортной системы в условиях неопределенности : сб. науч. тр. / Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР; отв. ред. А.А. Бакаев. Киев, 1990. С. 27—30.
2. Аккерман Г.Л. Выбор оптимального варианта трассы с помощью ЭВМ : Дис. ... канд. техн. наук. М., 1964.
3. Аккерман Г.Л., Аккерман С.Г., Полищук И.В. Неопределенность в управлении инфраструктурой железных дорог // Транспорт Урала. 2011. № 4. С. 3—6.
4. Стратонович Р.Л. Теория информации. М. : Советское радио, 1973. 143 с.
5. Романов А.А. Технико-экономическое обоснование параметров дорог, возводимых в районах со сложными природно-климатическими условиями // Научные проблемы сооружения БАМ : сб. науч. тр. / НИИЖТ. Новосибирск, 1975. Вып. 170. С. 73—81.
6. Коротовский Н.М. Анализ отклонения грузопотоков от проектных на эксплуатируемых железных дорогах // Вопросы проектирования, строительства и содержания железнодорожного пути и сооружений в условиях Урала и Сибири : сб. науч. тр. / УЭМИИТ. Екатеринбург, 1979. Вып. 60. С. 81—90.
7. Аккерман Г.Л. и др. Опыт автоматизированного трассирования автомобильных дорог в области распространения мерзлых торфяников. М., 1989.
8. Аккерман Г.Л., Гавриленко А.В. Аналитический метод укладки линии заданного уклона : сб. тр. МИИТ. 1964. № 181.
9. Таха Х. Введение в исследование операций : пер. с англ. М. : Мир, 1985. Т. 1. 479 с.
10. Венцель Е.И. Теория вероятности. М. : Наука, 1974. 576 с.

References

1. Bazhan L.I. Modelirovanie razvitiya struktury parka avtotransportnoj sistemy v usloviyakh neopredelennosti [Simulation of fleet structure development of motor system in conditions of ambiguity] // Sb. nauch. tr. / In-t kibernetiki im. V.M. Glushkova AN USSR; Otv. Red. A.A. Bakaev. Kiev, 1990. S. 27—30.
2. Akkerman G.L. Vybora optimalnogo varianta trassy s pomoshchju EVM [Choice of route optimum alternative with the help of computer]: Diss. ... kand. tekhn.nauk. M. 1964 g.
3. Akkerman G.L., Akkerman S.G., Polishchuk I.V. Neopredelennost v upravlenii infrastrukturoj zhelezných dorog [Ambiguity in management of railways' infrastructure] // Transport Urala. 2011. №4. S. 3—6.
4. Stratonovich R.L. Teoriya informatsii [Theory of information]. M: Sovetskoe radio, 1973. 143 s.
5. Romanov A.A. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie parametrov dorog, vozvodimykh v rajonakh so slozhnyimi prirodno-klimaticheskimi uslovijami [Technical and economic assessment of roads' characteristics constructed in regions with severe natural and climatic conditions] Nauchnye problemy sooruzhenija BAM: Sb. nauch. tr./ NIIZhT. Novosibirsk, 1975. Vyp. 170. S. 73—81.
6. Korotovskiy N.M. Analiz otklonenija gruzopotokov ot proektnykh na ekspluatiruemykh zhelezných dorogakh [The analysis of cargo flows shift from designed ones on operated railways] // Voprosy proektirovanija, stroitelstva i soderzhanija zheleznodorozhnogo puti i sooruzhenij v uslovijakh Urala i Sibiri: Sb. nauch. tr./UEMIIT. Ekaterinburg. 1979. Vyp. 60. S.81—90.
7. Akkerman G.L. and others. Opyt avtomatizirovannogo trassirovanija avtomobil'nyh dorog v oblasti rasprostraneniya merzlyh torfjanikov. [Experience in automated roads tracing in the frozen peat bogs area0.] M., 1989.
8. Akkerman G.L., Gavrilenko A.V. Analiticheskij metod ukladki linii zadannogo uklona [Analytical method of track laying of set gradient]// Sb. trudov MIIT. 1964. №181.
9. Taha H.A. Operations Research (in russian). M. : Mir, 1985. vol. 1. 479 p.
10. Wentsel E. Teoriya veroyatnosti. [The theory of probability.] Moscow: Nauka, 1974. 576 p.

УДК 625.151.9

Дмитрий Аркадьевич Басовский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и технология строительства» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)

О ВОЗМОЖНОСТИ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ ДОРОГ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Dmitriy A. Basovsky, PhD, associate professor of 'Management and technologies of construction' chair of Saint-Petersburg State Transport University (PGUPS)

Potential Interchangeability Of Turnouts For Railways Not Of General Use

Аннотация

Предложен новый принцип взаимозаменяемости, при котором все увязки новых переводов с существующими путевыми схемами должны обеспечиваться за счет соответствующих изменений не параметров путевого развития, а параметров эпюр самих стрелочных переводов. Затраты на эти изменения значительно дешевле затрат на реконструкцию путевых схем, примыкающих к заменяемому переводу. В этом и заключается ресурсосберегающая идея предлагаемого принципа. Проведен анализ существующих методов расчета стрелочных переводов с применением их практических длин на предмет возможности и целесообразности их применения для реализации предлагаемого принципа взаимозаменяемости.

В целом проведенные исследования показали, что максимальный эффект от реализации нового принципа взаимозаменяемости может быть достигнут на основе комплексного использования существующих методов расчета стрелочных переводов с изменением практических длин.

Ключевые слова: стрелочный перевод, стрелка, переводная кривая, крестовина, взаимозаменяемость.

Annotation

It is offered the new principle of interchangeability, which should provide adaptation of new turnouts with the existing track plans through corresponding changes in turnout parameters rather than changes of track parameters. The costs on these changes are considerably less than the costs on reconstruction of track plans, adjoining the replaceable turnout. В этом и заключается ресурсосберегающая идея предлагаемого принципа. The analysis of existing methods of turnout calculations using their practical length has been conducted in order to study the feasibility of their application in implementing the proposed interchangeability principle.

In whole the conducted research has shown that the maximum effect from the interchangeability principle implementation can be achieved on the basis of combined use of existing methods of turnout calculation through changing their practical length.

Key words: turnout, switch, switching curve, frog, interchangeability.

Предлагается новый принцип взаимозаменяемости стрелочных переводов, при котором все увязки новых переводов с существующими путевыми схемами должны обеспечиваться за счет соответствующих изменений не параметров путевого развития, а параметров эпюр самих стрелочных переводов.

Затраты на эти изменения значительно дешевле затрат на реконструкцию путевых схем, примыкающих к заменяемому переводу. В этом заключается ресурсосберегающая идея предлагаемого принципа.

Основой для формирования методической базы нового принципа взаимозаменяемости путевых конструкций может служить теория расчета стрелочных переводов с увеличением и уменьшением их практических длин.

На сегодня эта теория располагает двумя принципиально различающимися схемами укладки стрелочных переводов.

По первой схеме изменение практической длины перевода обеспечивается за счет различной длины прямых вставок, которые специально для этих целей включаются в переводные кривые. По другой тот же эффект достигается посредством устройства угла перегиба рабочих кантов в пределах ответвлений стрелочных переводов.

Расчет параметров стрелочных переводов с прямыми вставками в переводных кривых ведется традиционным методом проекций его геометрических размеров на две взаимно перпендикулярные оси X и Y , одна из которых X совпадает с направлением прямого пути [1].

Результаты расчета представлены в виде графических зависимостей радиусов переводных кривых и размеров прямых вставок от практических длин переводов (рис. 1).

Для каждой из исследуемых марок переводов представлено по два графика:

- $R_2=f(L)$ — зависимости радиусов переводных кривых от практических длин стрелочных переводов;
- $l=f(L)$ — зависимости размеров прямых вставок в ответвлениях от практических длин переводов.

На графиках $R_2=f(L)$ нанесены ограничения радиусов переводных кривых. Во всех случаях эти радиусы не должны быть:

- для стрелочных переводов марки 1/9 — меньше $R_2^{\min}=180$ м;
- для переводов марки 1/7 — меньше $R_2^{\min}=117$ м;
- для переводов марки 1/5 — меньше $R_2^{\min}=54$ м.

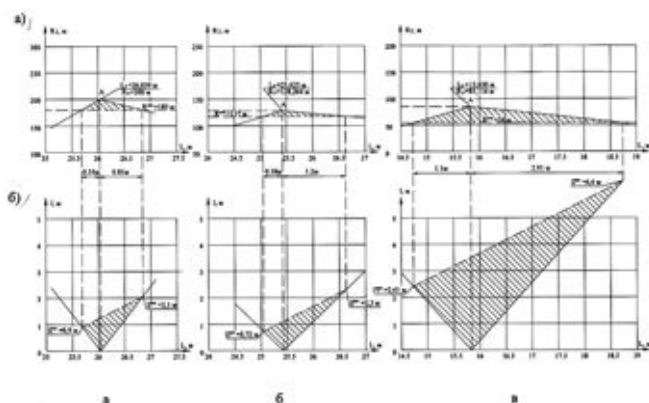


Рисунок 1 — Нанесение ограничений практической длины L по радиусу R_2 переводной кривой в переводах марок: а — 1/9; б — 1/7; в — 1/5

Ограничения перенесены на графики $l=f(L)$. Для наглядности зоны на графиках, соответствующие допустимым значениям радиусов R_2 , выделены штриховкой.

Из графиков, приведенных на рис. 1а, видно, что изучаемая схема укладки удлиненных и укороченных стрелочных переводов позволяет изменять практические длины переводов марки 1/9:

- в меньшую сторону по сравнению с номинальной практической длиной L_0 на 0,35 м;
- то же в большую сторону — на 0,81 м;
- суммарный диапазон возможного изменения практической длины — 1,16 м, что составляет 25% от максимального различия практических длин стрелочных переводов данной марки, равного 4,745 м для переводов с минимальными вылетами рамных рельсов (рис. 2).

При этом максимальные длины прямых вставок составляют:

- со стороны крестовины $l_k^{\max}=0,9$ м (в укороченных переводах);
- со стороны стрелки $l_c^{\max}=2,1$ м (в удлиненных переводах).

Максимально возможные изменения длин для стрелочных переводов марки 1/7 (см. рис. 1б):

- в меньшую сторону на 0,38 м;
- в большую — на 1,2 м;
- суммарное значение изменения — 1,58 м.

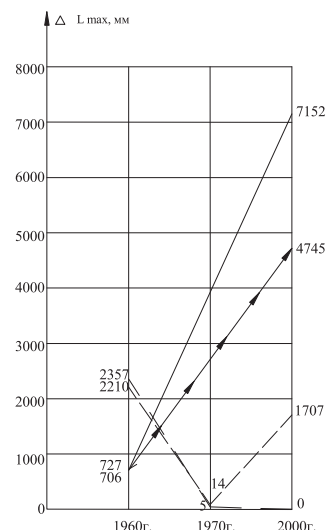
Максимальные различия практических длин переводов марки 1/7 как с увеличенными, так и с минимальными передними вылетами рамных рельсов (рис. 3) составляют на сегодня 1,707 м.

Максимальные длины прямых вставок в переводные кривые достигают:

- со стороны крестовины $l_k^{\max}=0,2$ м;
- со стороны стрелки $l_c^{\max}=2,3$ м.

И наконец, у стрелочных переводов марки 1/5 (см. рис. 1в) возможные пределы изменения практических длин в меньшую сторону ограничиваются 1,1 м и 2,91 м в большую сторону. Суммарное изменение — 4,01 м, а длины прямых вставок составляют: со стороны крестовины — 2,41 м, со стороны стрелки — 6,4 м.

Можно заключить, что укладка удлиненных и укороченных переводов с прямыми вставками в ответвлениях (схема I) позволяет реализовать предлагаемый принцип взаимозаменяемости, но обладает одним недостатком: в нем изменение длин



- Стрелочные переводы марки 1/9 с увеличенными передними вылетами рамных рельсов (р.р);
- То же с минимальными вылетами;
- Стрелочные переводы марки 1/7
- Стрелочные переводы марки 1/5

Рисунок 2 — Максимальные различия практических длин стрелочных переводов каждой марки

стрелочных переводов как в меньшую, так и в большую сторону обеспечивается за счет уменьшения радиусов переводных кривых, что ухудшает условия плавности прохода подвижного состава по ответвлениям переводов.

Расчет стрелочных переводов с углами перегиба рабочих кантов в ответвлениях ведется методом хорд, который получил свое развитие применительно к расчету стрелочных переводов переменной длины в 90-е годы [2].

По данной методике был проведен расчет основных линейных и угловых параметров стрелочных переводов марок 1/9, 1/7 и 1/5. По результатам расчета построены графики зависимостей этих параметров (см. рис. 3).

На каждом из представленных схем приведено по два графика, отражающих зависимости:

а) $R_2=f(L)$ радиусов переводных кривых от практических длин переводов;

б) $\Delta\alpha=\varphi(L)$; $\Delta\beta=\psi(L)$ углов перегиба рабочих кантов со стороны крестовины ($\Delta\alpha$) и стрелки ($\Delta\beta$) от практических длин.

Как показано на графиках, углы перегиба со стороны стрелки ($\Delta\beta$) имеют место при уменьшении длины перевода, а со стороны крестовины ($\Delta\alpha$) — при увеличении его длины.

Ограничения здесь вводятся именно по величине этих углов. Мы не можем допустить, чтобы они превышали углы набега на острия и на отводы усювиков: для переводов марок 1/9 и 1/7 $\gamma_0=1^\circ$, для переводов марки 1/5 $\gamma_0=1^\circ 42'$.

С графиков б) эти ограничения перенесены на графики а), что позволяет оценить диапазон изменения не только практических длин стрелочных переводов L , но и радиусов переводных кривых R_2 . Зоны, соответствующие этому диапазону, выделены штриховкой.

Исходя из графиков (см. рис. 3а) можно заключить, что общий диапазон изменения практических длин стрелочных переводов марки 1/9 достигает 2,77 (1,26 м — в меньшую и 1,51 м — в большую стороны), т. е. превосходит более чем в 2 раза тот же показатель при схеме укладки переводов с прямыми вставками.

Кроме того, при уменьшении длины перевода радиус переводной кривой R_2 увеличивается до 253 м, а при увеличении длины радиус может достигать 309 м.

У стрелочных переводов марки 1/7 (см. рис. 3б) суммарный диапазон изменения практических длин 2,34 м (1,06 м — в меньшую сторону и 1,28 м — в большую), что на 48% превосходит тот же показатель схемы укладки перевода с прямыми вставками. При этом радиусы переводных кривых увеличиваются в сокращенных переводах до 143 м, в удлинённых — до 171 м.

Стрелочные переводы марки 1/5 (см. рис. 3в) имеют максимальный диапазон изменения практических длин 2,33 м (1,02 м — в меньшую и 1,31 м — в большую сторону). По данному показателю они уступают на 42% переводам той же марки, укладываемым по схеме с прямыми вставками в переводных кривых. Но сами радиусы переводных кривых R_2 при сокращении и удлинении перевода увеличиваются соответственно до 103 и 131 м.

Недостатком укладки удлинённых и укороченных переводов с углами перегиба рабочих кантов в ответвлениях (схема II) является наличие в их ответвлениях углов перегиба рабочих кантов, которые создают горизонтальные неровности при проходе по переводу подвижного состава.

В целом недостатки, присущие обеим рассмотренным схемам укладки переводов, касаются условий движения по ним экипажей, но не исключают возможности укладки стрелочных переводов с увеличением и уменьшением их практических длин в пределах, обеспечивающих возможность их взаимозаменяемости.

Для сравнительного анализа этих схем с точки зрения их преимуществ и недостатков при использовании в целях взаимозаменяемости вышеупомянутые зависимости приведены на совместном графике (рис. 4).

Две наклонные прямые, направленные вниз из точки А, характеризуют изменение радиуса R_2 при укладке удлинённых и укороченных стрелочных переводов по I схеме. В этом случае при изменении практической длины L в любую сторону относительно номинала радиус переводной кривой уменьшается, а в ответвлении появляется прямая вставка. И то и другое отрицательно сказывается на условиях вписывания подвижного состава.

При укладке переводов по II схеме зависимость $R_2 = f(L)$ выражается параболой с минимумом в точке А и ветвями, направленными вверх. В этом случае при отклонении практической длины от номинала в любую сторону радиус переводной

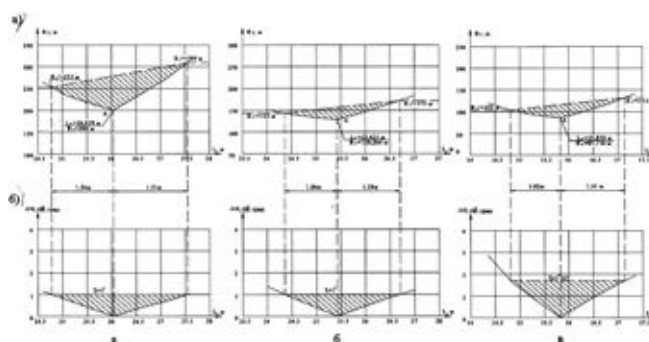


Рисунок 3 — Нанесение ограничений практической длины L по величине углов $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ перегиба рабочих кантов в ответвлениях переводов марок: а — 1/9; б — 1/7; в — 1/5

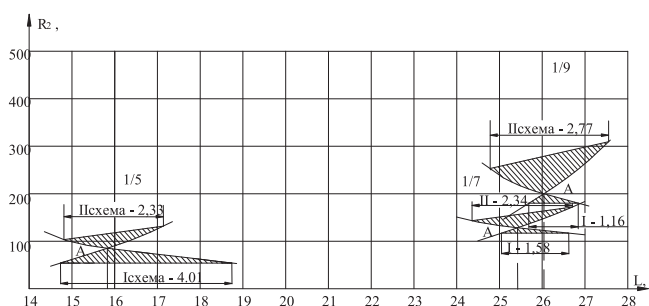


Рисунок 4 — Сравнение существующих схем взаимозаменяемости разноразмерных переводов

кривой R_2 увеличивается, а прямых вставок в ответвлении перевода не образуется. Это бесспорное преимущество схемы II перед существенным недостатком, который заключается в наличии углов перегиба рабочих кантов, увеличивающихся вместе с увеличением радиуса R_2 .

На рис. 4, как и на исходных графиках, штриховкой и размерными стрелками показаны допустимые диапазоны изменения практических длин переводов.

Эти диапазоны для различных марок неодинаковы. Для каждой марки перевода пределы изменения L при укладке по I и II схемам также отличаются друг от друга. Суммарная величина этих пределов от 1,16 до 4,01 м подтверждает возможность реализации предлагаемого принципа взаимозаменяемости стрелочных переводов на основе уже известных схем и методов расчета.

Вышеотмеченные недостатки существующих схем укладки удлинённых и укороченных стрелочных переводов требуют дальнейшего совершенствования этих схем.

Литература

1. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987.
2. Говоров В.В., Басовский Д.А. Унификация стрелочных переводов ведомственных железнодорожных путей // Транспорт: наука, техника, управление. 2011. № 4. С. 38—41.

References

1. Shakhunjants G.M. Zheleznodorozhnyj put. [Railway track] M., Transport, 1987.
2. Govorov V.V., Basovskij D.A. Unifikatsiya strelochnykh perevodov vedomstvennykh zheleznodorozhnykh putej [Unification of departmental railway tracks' turnouts] // Transport: nauka, tehnika, upravlenie. 2011. № 4. S. 38 — 41.

УДК 621.331:621.316

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), действительный член АЭН РФ, директор научного производственного предприятия НПП «Электромаш» (Екатеринбург)

СИСТЕМА УПРАВЛЯЕМОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ПРОПУСКА СКОРОСТНЫХ И ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ

Boris A. Arzhannikov, DSc, prof. of «Transport Power Supply» Department, member of Academy of Electric sciences, director of Research & Development Production Enterprise "Electromash" (Yekaterinburg)

The System Of Controlled Traction Power Supply Of Direct Current For High-Speed And Heavy Trains' Handling

Аннотация

Рассматриваются вопросы усиления системы тягового электро-снабжения постоянного тока 3,0 кВ. Строительство промежуточных тяговых подстанций приводит к неоправданным затратам, так как при пропуске тяжеловесных грузовых и пассажирских скоростных поездов мощности соседних подстанций недоиспользуются. Очевидно, что в этих условиях необходим новый технологический процесс передачи электрической энергии — путем управления перераспределением мощности тяговых подстанций. Требуется согласованная совместная работа соседних тяговых подстанций, т. е. создание системы управляемого тягового электроснабжения. Технической основой для создания управляемого тягового электроснабжения служит тяговое трансформаторное оборудование с бесконтактным автоматическим 20%-м диапазоном регулирования выпрямленного напряжения тяговых подстанций — трансформаторы ТДПУ-20000/10(35), ТДП-16000/10(35), ТРДП-16000/10(35), реакторы РТДП-6300/10(35), шкафы автоматического регулирования напряжения типа ШАУН.

Ключевые слова: автоматическое регулирование напряжения, тяговый режим, система управляемого тягового электроснабжения, рекуперация.

Annotation

The article is devoted to problems of system of traction power supply of direct current 3,0 kV amplification. Construction of intermediate traction substations leads to unreasonable costs as during heavy trains' and high-speed passenger trains' handling, power capacities of adjacent substations are not fully used. It is evident that in such conditions it is necessary to use a new operating procedure of electric power transfer by control of traction substations' power redistribution. Agreed work of adjacent traction substations is required so creation of system of controlled traction power supply. Technical base for creation of controlled traction power supply is traction transformer equipment with non-contact automatic 20% adjustment range of rectified voltage of traction substations (transformers, TDP-20000/10(35), TDP-16000/10(35), TRDP-16000/10(35), reactors RTDP-6300/10(35), automatic voltage control console of SHAUN type)

Key words: automatic voltage control, traction mode, system of controlled traction power supply, recuperation.

Основными задачами управляемой системы тягового электроснабжения [1] являются повышение и регулирование напряжения в контактной сети при тяговом режиме работы электропоездов, обеспечение надежного рекуперативного торможения при переходе электропоезда в режим рекуперации и возможности приема избыточной энергии рекуперации инверторными агрегатами тяговых подстанций, контроль токов фидеров тяговых подстанций с целью исключения отключения фидерных автоматов от перегрузки с одновременным ограничением допустимых токов нагрузки проводов контактной сети.

Технической основой для создания управляемого тягового электроснабжения служит тяговое трансформаторное оборудование с бесконтактным автоматическим 20%-м диапазоном регулирования выпрямленного напряжения тяговых подстанций — трансформаторы ТДПУ-20000/10(35), ТДП-16000/10(35), ТРДП-16000/10(35), реакторы РТДП-6300/10(35), шкафы автоматического регулирования напряжения типа ШАУН. Для автоматического управления шкафами ШАУН и соответственно выпрямленным напряжением тяговых подстанций с целью поддержания напряжения в контактной сети (например, около поста секционирования) не ниже заданного уровня разработана система регулирования напряжения в контактной сети («Сирена»). С 2006 г. шкафы ШАУН5 и «Сирена» с использованием микропроцессорной техники выпускает НПП «Электромаш». При этом стоимость управляющих и регулирующих устройств несоизмеримо меньше, чем затраты на строительство дополнительных подстанций — принятого в качестве основного способа усиления тягового электроснабжения 3,0 кВ.

Разработка и внедрение двух новых типов регулируемых преобразовательных трансформаторов и вольтодобавочных устройств к нерегулируемым преобразовательным агрегатам могут быть использованы для создания управляемой системы тягового электроснабжения электрической тяги постоянного тока.

При управляемом тяговом электроснабжении важны учет и влияние соседних межподстанционных зон и связанного с

ним рационального принудительного управления мощностью параллельно работающих тяговых подстанций.

При движении скоростных поездов и поездов повышенной массы потребляются значительные тяговые токи, вызывающие потери напряжения в тяговой сети. Для сохранения полезной отдаваемой мощности электровоз при понижении напряжения вынужден работать с повышенным токопотреблением, что приводит к дополнительному увеличению потерь напряжения в тяговой сети.

При существующем тяговом электроснабжении электрическая мощность преобразовательных трансформаторов на подстанциях рассчитывается исходя из предпосылки равенства напряжений на соседних тяговых подстанциях. При нахождении поезда между подстанциями с одинаковым уровнем стабилизации выпрямленного напряжения электровозом потребляется мощность от двух соседних подстанций в соответствующей зависимости от сопротивления плеч питания. При нахождении поезда у тяговой подстанции электровозом потребляется мощность в основном только от этой подстанции. Управляющим параметром приведения в действие принудительного перераспределения мощности является достижение номинального тока тяговой подстанции (например, ТП2 на рис. 1) или предельного допустимого тока питающего фидера контактной сети этой же подстанции, а также достижение минимально допустимого напряжения в контактной сети.

Возможны несколько вариантов работы системы управляемого тягового электроснабжения с организацией каналов связи между подстанциями для подачи сигналов на повышение или на понижение выпрямленного напряжения [1].

На рис. 1 представлена структурная схема управляемого тягового электроснабжения без каналов связи между тяговыми подстанциями.

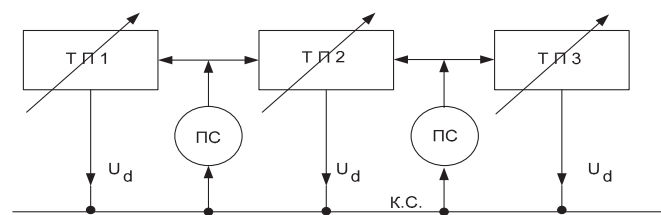


Рисунок 1 — Структурная схема управляемого тягового электроснабжения

Контролируемая по напряжению точка контактной сети, например пост секционирования ПС, посылает на две соседние подстанции информацию о снижении напряжения менее установленной контролируемой величины. Регулируемые тяговые подстанции плавно повышают напряжение.

На тяговых подстанциях с двумя и более преобразовательными агрегатами, оборудованными устройствами автоматического включения и отключения резерва (АВОР), в контроле тока тяговой подстанции нет необходимости. Номинальный ток двух преобразовательных агрегатов равен 6300 А. Ток длительного режима нового мощного электровоза 2ЭС10 со-

ставляет $I_{\text{э.д.}} = \frac{P_{\text{д.}}}{U_{\text{ЭН}}} = \frac{8400}{3} = 2800 \text{ А}$, а ток часового режима

$I_{\text{э.ч.}} = \frac{8800}{3} = 2933 \text{ А}$. При постоянной реализуемой электро-

вом мощности и практически линейной зависимости тока электровоза от напряжения [2] повышение напряжения тяговой подстанции до 3,3 кВ (в 1,1 раза) вызывает снижение длительного тока электровоза с 2800 до 2545 А и часового тока с 2933 до 2666 А.

При этом нужно контролировать ток нагруженных фидеров двух-, трехагрегатных тяговых подстанций. Кроме того, возможны случаи, когда на грузонапряженных и протяженных межподстанционных зонах требуется введение дополнительного устройства повышения напряжения в тяговой сети, например пункта повышенного напряжения ППН [3] или одноагрегатного тягового блока ОТБ [4]. Сравнительная технико-энергетическая оценка ППН и ОТБ [1, 5] по потере мощности, по количеству и составу оборудования, по объему работ показывает, что усиление системы тягового электроснабжения с применением ОТБ является более предпочтительным.

На примере тяговой подстанции с ОТБ выполнение задачи управляемого электроснабжения производится по алгоритму, представленному функциональной схемой на рис. 2.

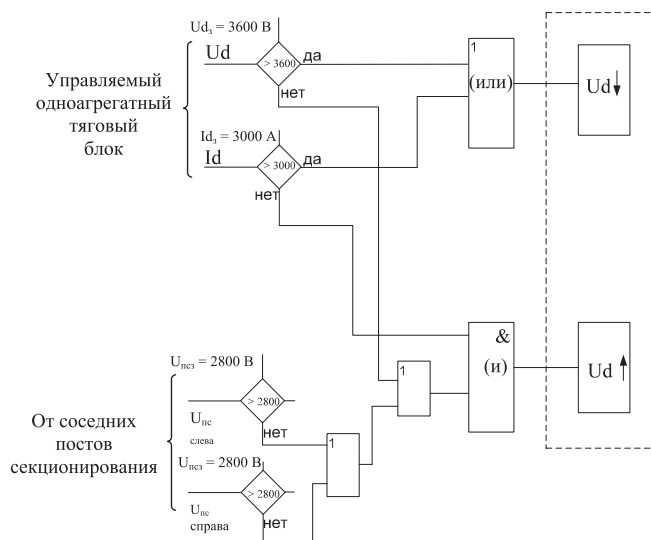


Рисунок 2 — Функциональная схема алгоритма работы системы управляемого тягового электроснабжения с одноагрегатным тяговым блоком

При отсутствии сигнала критической величины тока нагрузки одноагрегатного тягового блока или тока фидера двух-, трехагрегатной тяговой подстанции происходит выполнение следующих операций алгоритма.

1. Регулирование выходного напряжения тяговой подстанции на исходном стабилизированном уровне, например 3600 В.

2. Автоматическое снижение уровня стабилизированного напряжения при повышении рекуперирующим электровозом напряжения на шинах тяговой подстанции более 3600 В. Это способствует передаче энергии рекуперации через шины подстанции на соседнюю межподстанционную зону, и при нулевом значении тока тяговой подстанции включается инверторный агрегат для приема избыточной энергии рекуперации. После сброса или снижения тока рекуперации система возвращается в исходное состояние с уровнем стабилизации 3600 В. Такое действие алгоритма направлено на повышение эффективности рекуперации.

Первый вариант функциональной схемы соответствует рис. 2. Если при поступлении сигнала о напряжении на посту секционирования менее, например, 2800 В, а на подстанциях и на ОТБ токи подстанции или фидера не достигли предельной величины, то система плавно повышает выходное напряжение одной из подстанций и подстанции с ОТБ до возможного предельного уровня 3700 В, независимо от наличия на межподстанционной зоне электровоза с рекуперативным режимом работы, обеспечивая приоритет тягового режима.

По второму варианту функциональной схемы повышение напряжения на посту секционирования производится только двух-, трехагрегатной тяговой подстанцией. При этом связь между постом секционирования и одноагрегатным тяговым блоком отсутствует.

При превышении током нагрузки предельной величины (например, номинального тока преобразователя 3150 А одноагрегатного тягового блока или предельного допустимого тока фидера) ограничение тока преобразователя производится понижением напряжения на одноагрегатном тяговом блоке или на регулируемых преобразовательных агрегатах тяговых подстанций, в районе которых находится скоростной или тяжеловесный поезд. При отсутствии предельно допустимых токов на ТП и ОТБ и если происходит понижение напряжения на постах секционирования менее заданной величины (например, 2800 В), то с ПС на соседнюю подстанцию поступает сигнал о повышении напряжения.

По третьему варианту на всех тяговых подстанциях устанавливается максимальный уровень стабилизации напряжения 3700 В, допустимый для участков с рекуперативным торможением [6]. Каналы связи от постов секционирования и аппаратура на тяговых подстанциях, относящаяся к этим каналам, отсутствует. На одноагрегатном тяговом блоке контролируется ток агрегата в соответствии с функциональной схемой на рис. 2, а на других подстанциях, если это необходимо, контролируется ток отдельных фидеров.

Контроль тока фидера тяговых подстанций при управляемом тяговом электроснабжении производится не только для исключения отключения фидерных автоматов при достижении тока по фидеру тока уставки автомата, но и для ограничения токов по проводам контактной сети.

При скоростном движении поездов резко вырастают токовые нагрузки на провода контактной сети. Так, по расчетам ВНИИЖТ и проектного института «Трансэлектропроект», величина тока электропоезда при скорости движения 250 км/ч составляет 4200 А.

Токовые нагрузки проводов контактной сети КС-200 составляют:

- длительные 1840 А;
- трехминутные 2390 А;
- одномоментные 4590 А.

Соответственно провода контактной подвески будут перегружены током электропоезда при длительном протекании тока по контактной сети.

Рассмотрим возможности системы управляемого тягового электроснабжения по обеспечению пропуска скоростного электропоезда со скоростью 250 км по двум межподстанционным зонам длиной каждая по 20 км, представленным на рис. 3.

При нахождении электропоезда в середине межподстанционной зоны и при одинаковом километровом сопротивлении контактной сети фидерные токи подстанций при равных стабилизированных напряжениях подстанций на уровне 3700 В составят 2100 А. По мере приближения электропоезда к подстанции ТП 2 увеличивается фидерный ток этой подстанции.

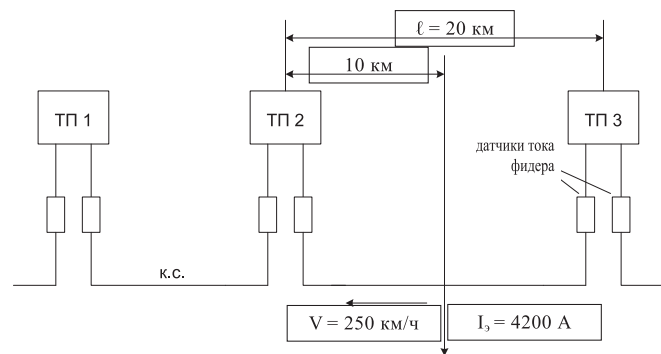


Рисунок 3 — Схема двух межподстанционных зон со скоростным электропоездом

Для уменьшения тока фидера и соответственно в проводах контактной сети необходимо понижать напряжение на ТП 2. Для этого в алгоритм работы шкафа ШАУН5 [7] вводится ограничение тока по фидерам на уровне, равном половине максимального тока электропоезда. В рассматриваемом случае ток ограничения может быть принят равным 2000—2100 А. При нахождении электропоезда в районе ТП 2 (как при приближении электропоезда к ТП 2, так и при удалении от нее) напряжение на ТП 2 понижается до минимального уровня стабилизации 3400 В, тем самым передается часть тока электропоезда на тяговые подстанции ТП 1 и ТП 3, на которых напряжение стабилизировано также на уровне 3700 В. При приближении электропоезда к середине зоны между подстанциями ТП 1 и ТП 3 напряжение на ТП 2 повышается до 3700 В, обеспечивая допустимое напряжение на токоприемнике электропоезда.

Процесс понижения напряжения на ТП 2 длится в течение времени прохождения электропоезда от середины межподстанционной зоны ТП 3 — ТП 2 до подстанции ТП

2, что составляет $t_x = \frac{10 \cdot 60}{250} = 2,4$ мин. Такое же время за-

нимает процесс повышения напряжения на ТП 2 при движении электропоезда от ТП 2 до середины зоны ТП 2 — ТП 1.

С целью более глубокого ограничения фидерных токов тяговых подстанций возможно снижение напряжения подстанций переводом работы преобразовательных агрегатов со стабилизированной характеристики на естественную с напряжением холостого хода 3400 В [7, 8].

Литература

1. Аржанников Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2011. 176 с.
2. Аржанников Б.А., Пышкин А.А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования тяговых подстанций. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2006. 118 с.
3. Федотов А.А., Васильев С.Н., Мизинцев А.В. и др. Энергоснабжение контактной сети постоянного тока с питанием повышенным напряжением преобразователя по усиливающему проводу : матер. 2-го междунар. симп. / ПГУПС. СПб., 2003.
4. Аржанников Б.А., Левин А.М. Одноагрегатная регулируемая подстанция // Железнодорожный транспорт. 1991. № 8. С. 44—46.
5. Аржанников Б.А., Немытых Л.Н. Усиление системы электроснабжения постоянного тока // Транспорт Урала. 2006. № 1. С. 2—8.
6. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов / под ред. С.И. Осипова. М. : Транспорт, 1984. 280 с.
7. Пат. РФ № 2415033. Устройство для автоматического регулирования напряжения на тяговой подстанции и в контактной сети / Аржанников Б.А., Фролов Л.А. № 2009129436; заявл. 30.07.2009; опубл. 27.03.2011. Бюл. № 9.
8. Пат. РФ № 2339992. Устройство для регулирования переменного напряжения / Аржанников Б.А. № 2007141901; заявл. 12.11.2007; опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.

References

1. Arzhannikov B.A. Sistema upravljajemogo elektrosnabzhenija elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postojannogo toka: monografija [The system of controlled power supply of electrified railways of direct current: monograph]. Ekaterinburg: UrGUPS, 2011. 176 s.
2. Arzhannikov B.A., Pyshkin A.A. Sovershenstvovanie sistemy elektrosnabzhenija postojannogo toka na osnove avtomaticheskogo regulirovanija tjagovykh podstantsij [The system improvement of direct current power supply on the basis of automatic traction substations control]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. gos. un-ta putej soobshchenija, 2006. 118 s.
3. Energосnabzhenie kontaktnoj seti postojannogo toka s pitaniem povyshennym naprjazheniem preobrazovatelja po usilivajushchemu provodu [Contact system power supply of direct current with increased voltage of transformer along reinforcing wire] / A.A.Fedotov, S.N.Vasiliev, A.V. Mizintsev i dr. // Materialy 2-go mezhdunarodnogo simpoziuma / PGUPS. S. – Peterburg, 2003.
4. Arzhannikov B.A., Levin A.M. Odnoagregatnaja reguliruemaja podstantsija [Single modular controlled substation] // Zheleznodorozhny transport. 1991. № 8. S. 44 – 46.
5. Arzhannikov B.A., Nemytykh L.N. Usilenie sistemy elektrosnabzhenija postojannogo toka [Amplification of system of direct current power supply]// Transport Urala. 2006. № 1. S. 2–8
6. Ratsionalnye rezhimy vozhdenija poezdov i ispytaniya lokomotivov [Rational modes of trains' construction and locomotives' tests] / Pod red. S.I.Osipova. M.: Transport, 1984. 280 s.
7. Pat. RF № 2415033 na izobretenie, MPK V60M 3/02, N02M 5/257 [Patent of Russian Federation № 2415033 for invention, MPK V60M 3/02, N02M 5/257]. Ustrojstvo dlja avtomaticheskogo regulirovanija naprjazhenija na tjagovoj podstantsii i v kontaktnoj seti / Arzhannikov B.A., Frolov L.A. №2009129436 ; zajavl. 30.07.2009 ; opubl. 27.03.2011, Bjul. № 9. Pat. RF № 2339992 na izobretenie MPK G05FD 1/14.
8. Ustrojstvo dlja regulirovanija peremennogo naprjazhenija [Device for AC voltage control] /Arzhannikov B.A. № 2007141901 ; zajavl. 12.11.2007 ; opubl. 27.11.2008, Bjul. № 33

УДК 621.316.9

Александр Михайлович Костроминов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС),
Ольга Геннадьевна Евдокимова, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)

МОДЕЛИ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Alexander M. Kostrominov, DSc, Professor of 'Electric coupling' chair of Saint Petersburg State Transport University (PGUPS),
Olga G. Evdokimova, post-graduate student of 'Electric coupling' chair of Saint Petersburg State Transport University (PGUPS)

Models Of Grounding Devices In Automatic Train Control

Аннотация

Существующие типовые технические решения по молниезащите и заземлению в современных системах обеспечения движения поездов (СОДП) на практике оказываются недостаточно эффективными.

Для улучшения характеристик заземлителей предлагается использовать перспективные модульно-стержневые конструкции с цинковым антикоррозионным покрытием, выполненным по термодиффузионной технологии, обеспечивающие независимость сопротивления заземления от сезонных колебаний температуры, высокую травмостойкость и антикоррозионную защиту.

В приложение к модульно-стержневым заземлителям для эффективного решения задач расчета и проектирования заземляющих устройств СОДП любой конфигурации с гальваническими и электромагнитными связями в широком диапазоне частот исследована и обоснована возможность использования цепно-полевой модели.

Ключевые слова: заземляющее устройство, заземлитель, импульсные токи молниевых разрядов, модель, расчет.

Annotation

The existing typical technical solutions on lightning guard and grounding in automatic train control proved to be inefficient.

In order to improve grounding conductors' characteristics it is offered to use perspective modular-framing constructions with zinc-anticorrosive coating, made by thermo-diffusion technology, providing independence of grounding resistance from seasonal temperature disturbance, high injury-resistance and anticorrosive protection.

In addition to modular-framing groundings to effectively solve the tasks of calculation and design of grounding conductors in automatic train control of any configuration with galvanic and electromagnetic couplings in broad band it is examined and justified the possibility of a chain-field model use.

Key words: a grounding device, a grounding conductor, pulse currents of lightning discharges, model, calculation

Введение

Проблема защиты электротехнических устройств в системах обеспечения движения поездов от мощных импульсных помех, в частности помех, создаваемых молниевыми процессами, занимает приоритетное место среди ключевых задач повышения надежности устройств автоматики и связи, обеспечивающих бесперебойную работу систем управления движением поездов и других объектов инфраструктуры железнодорожного хозяйства. При этом защищенность СОДП от импульсных токов молниевых разрядов во многом зависит от конструкции заземляющего устройства (ЗУ) и его технического состояния.

Существующие типовые технические решения по молниезащите автоматических систем управления на железнодорожном транспорте на практике оказываются недостаточно эффективными [1].

Заземление большинства находящихся в эксплуатации объектов СОДП спроектировано по Правилам и монтажу устройств СЦБ (ПР 32 ЦШ от 10.02.96), не соответствующим современным международным требованиям защиты цифровой аппаратуры от сбоев и повреждений при молниевом разряде. Улучшение характеристик заземляющего устройства СОДП на высокой частоте имеет некоторые особенности, которые необходимо учитывать. В частности, заземляющие устройства должны предотвращать появление мешающих и опасных перенапряжений на устройствах СОДП, а расчет зон защиты от молниевых процессов требует знания реальной картины распределения токов и потенциалов по элементам заземляющего устройства объекта при молниевом разряде.

В связи с этим весьма актуальными являются задачи математического моделирования физических процессов в ЗУ, позволяющие оценивать характеристики ЗУ с учетом всех взаимных электромагнитных и гальванических связей между его элементами.

Цель настоящей работы — проанализировать специфику ЗУ СОДП, определить перспективные конструкции ЗУ с учетом результатов анализа найти наиболее рациональный подход к исследованию свойств заземляющего устройства СОДП

и решению задач синтеза оптимальных топологий ЗУ при воздействии импульсных токов молниевых разрядов.

Анализ специфики организации заземления в СОДП и особенностей функционирования ЗУ

Системы обеспечения движения поездов в части ЗУ имеют ряд специфических особенностей по отношению к системам электроэнергетики.

Первой важной особенностью СОДП являются малые токи короткого замыкания (КЗ) на землю в подсистеме внешнего электроснабжения, с одной стороны, и существенное влияние импульсного тока молниевых разрядов на надежность СОДП — с другой [1]. При этом малые токи КЗ на землю в подсистеме внешнего электроснабжения обусловили сравнительно высокие нормативы на допустимые сопротивления заземлений (4—10 Ом).

Второй особенностью СОДП, а значит, подсистем электрической централизации стрелок и сигналов является наличие многочисленных кабельных цепей радиального типа (расположенных радиально относительно заземлителя), которые непреднамеренно становятся соединительными линиями между заземлителем и удаленной землей, в том числе и рельсами с их высокой электропроводностью [1]. При этом в результате воздействия электрического поля молниезащитного заземлителя при протекании по нему токов молний возникают условия поражения изоляции кабелей без металлопокрова.

Третья отличительная особенность СОДП заключается в наличии в системе квазизаземлителей, роль которых выполняют рельсовые линии.

Следует принимать во внимание еще одно важное обстоятельство: вблизи заземляющих устройств СОДП в системе железнодорожной инфраструктуры могут находиться на незначительном удалении ЗУ других систем, имеющих иную ведомственную подчиненность. Такая ситуация опасна тем, что при воздействии молний на соседние объекты возникают непреднамеренные связи с СОДП через проводимость земли между ЗУ, через общий источник питания, общие цепи проводной связи и др.

Анализ конструкций ЗУ

До 90-х гг. прошлого века проектирование ЗУ проводилось исходя из нормирования сопротивления ЗУ, которое рассчитывалось по инженерной методике аналитически [2]. В настоящее время в условиях перехода на электронную микропроцессорную элементную базу технологических систем управления движением поездов при выборе системы заземления на первый план вышли требования обеспечения высокой эффективности заземляющих устройств в широком диапазоне частот и их экономичность.

Исследования авторов статьи показали, что применение современных глубинных модульно-стержневых заземлителей (МСЗ) является экономически более выгодным по сравнению с традиционными из уголкового стали:

- существенно сокращается время на согласование мест установки заземлителей, так как стержневые точечные заземлители в меньшей степени имеют вероятность пересечения с коммуникациями, принадлежащими различным пользователям: электроэнергетикам, связистам, газовикам, теплосетям, охранникам и др.;

- сокращаются материальные затраты на восстановление покрытий поверх грунта (асфальтовых и мощеных дорожек, полов подвальных помещений, газонов и цветников);
- высокая эксплуатационная надежность (высокая травматическая стойкость стальных стержней заземлителей за счет антикоррозионного покрытия цинком термодиффузионным методом, предохраняющего от разрушения покрытия острыми кромками щебня или другими твердыми предметами при заглублении);
- независимость сопротивления заземления от сезонных колебаний температуры;
- другие факторы, снижающие эксплуатационные затраты на контроль и ремонт заземлителей.

Таким образом, применение модульно-стержневых конструкций может повысить экономическую эффективность строительства заземлителей.

Моделирование земли

В монографии [2] приводится большой обзор работ в области исследования заземлений. Некоторые моменты этого обзора представляют интерес в контексте данной работы. С самого начала развития этих исследований задачи теоретического описания заземляющих устройств относились к категории сложных задач электротехники. Трудности усугублялись тем, что электрическая структура верхних слоев земли, в которой располагаются заземлители, имеет неоднородное и изменяющееся во времени (по сезонам) удельное электрическое сопротивление.

В основе всех разделов теории заземляющих устройств (математического описания, расчета, эксплуатационного контроля) лежит модель системы «заземлитель — земля».

Главное условие достоверности расчетов ЗУ — соответствие модели земли ее реальной электрической структуре.

В расчетной модели многослойную структуру земли представляют как полупространство, состоящее из двух или в общем случае из нескольких слоев с однородным (в пределах одного слоя) удельным сопротивлением и поверхностями раздела между слоями, параллельными границе полупространства. Параметры слоев (толщина и удельное сопротивление) определяются на основе интерпретации данных вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) или с помощью других геофизических методов [2].

Расчеты заземлителей с помощью многослойной модели земли обладают высокой трудоемкостью, не гарантирующей к тому же достаточной точности расчета в грунтах с негоризонтальными границами слоев, что сдерживает применение многослойной модели земли в проектировании ЗУ.

Многослойную модель земли рекомендуется приводить к двухслойной модели путем замены подстилающих слоев одним эквивалентным, что создает разумный компромисс между трудоемкостью и точностью расчетов ЗУ.

Однако основной проблемой остается решение задачи приведения, построенной на аналитических расчетах простых заземлителей (вертикального стержня, горизонтальной полосы, кольца) [2], и трудности оценки погрешности расчетов ЗУ в приведенной двухслойной земле.

Для целей расчета ЗУ следует отметить, что при наличии двухслойной электрической структуры модели земли значение эквивалентного удельного сопротивления существенно

различается для горизонтальных и для вертикальных электродов заземлителя и зависит при прочих равных условиях от их длины и глубины заложения.

Таким образом, проектирование ЗУ должно вестись с учетом неоднородности грунта. При сезонных изменениях температуры и влажности грунта в качестве расчетного следует принимать максимальное значение удельного сопротивления грунта.

Модели расчета заземляющих устройств

Множество заземлителей условно можно разделить на две группы. Первая будет включать простые заземлители, состоящие всего из одного электрода, выполненного, например, в виде вертикального или горизонтального кругового стержня, тора (кольца) и т. д. Ко второй группе можно отнести сложные заземлители, состоящие из различных комбинаций горизонтальных и вертикальных электродов. Если все электроды сложного заземлителя расположены горизонтально и образуют на плане замкнутый контур с внутренними перемычками, то его называют заземляющей сеткой, а при наличии также и вертикальных электродов — комбинированным заземлителем.

Сопротивление заземлителя при растекании с него импульсного тока молниевых разрядов отличается от заземлителя при токе 50 Гц. Отличие вызывается большим значением тока молнии (до 200 кА) и значительной скоростью его изменения во времени на фронте импульса тока длительностью несколько микросекунд.

В общем случае схема замещения заземлителя некоторой длины l при импульсном токе молниевых разрядов состоит из распределенных параметров: проводимости G , индуктивности L , активного продольного сопротивления R и емкости C относительно земли (уровня нулевого потенциала). Задача расчета ЗУ при протекании импульсных токов оказывается очень сложной, требует больших комплексных исследований, включающих теоретическую разработку и привлечение методов моделирования, поскольку исследования в полевых условиях с использованием мощных импульсных установок очень трудоемки и требуют значительных средств.

Решение задачи расчета заземляющих устройств может быть получено с помощью уравнений длинных линий с распределенными параметрами или путем их приведения к П-образным схемам замещения (т. е. с помощью теории цепей с сосредоточенными параметрами) или на основе теории электромагнитного поля (конкретнее — теории антенн). В целях выбора наиболее эффективного теоретического инструмента расчета ЗУ в СОДП сопоставим эти подходы.

Отметим, что уравнения длинных линий широко используются для расчета ВЛ. В ЗУ трудности возникают с расчетом погонных параметров, определяемых положением эквивалентного обратного провода. Для подземных кабелей (аналог стержней заземлителя) положение этого провода определено в [3], однако рассчитать погонные параметры аналогично ВЛ не удастся, так как в области высоких частот действительная часть полного сопротивления принимает отрицательное значение.

В отличие от ВЛ, в заземляющем устройстве СОДП (в силу его специфики) растекание тока не упорядочено в одном направлении, поэтому допущение об описании его погонными

параметрами длинных линий, введенными в двумерной постановке, затруднено. Двумерное приближение при расчете параметров ЗУ приводит к погрешности. Повысить точность определения погонных параметров позволяют численные методы расчета электромагнитных полей, в частности метод конечных элементов [2], однако расчет ЗУ становится громоздким.

Таким образом, целесообразно отказаться от использования обратного провода при расчете погонных параметров. Теория длинных линий не соответствует требованиям задач расчета ЗУ СОДП при импульсном токе молниевых разрядов.

Теория цепей с сосредоточенными параметрами относится к наиболее простым расчетным инструментам ЗУ. Заземляющее устройство дискретизируется на элементы малой длины по сравнению с длиной электромагнитной волны. Затем элементы моделируются симметричными П-четыреполюсниками с продольными активно-индуктивными сопротивлениями и поперечными активно-емкостными проводимостями. Главным требованием при формировании модели, достигаемым исследователями разными способами, является адекватность применяемой схемной модели электромагнитному полю и процессам в ЗУ. В основу модели ЗУ положена итерационная процедура приведения матриц собственных и взаимных параметров четырехполюсников к диагональному виду, что соответствует цепной схеме с эквивалентными собственными параметрами звеньев. В первом приближении ЗУ принимается эквипотенциальным $\varphi = \text{const}$ и решением системы $R \cdot J = \varphi$, где R — матрица собственных и взаимных сопротивлений элементов, находятся стекающие токи J и рабочие проводимости элементов $g_i = J_i / \varphi$, $i = 1, \dots, N$. Проводимость узла определяется как полусумма рабочих проводимостей подключенных к нему элементов. Внешняя индуктивность элементов находится приближенно по формуле Ф. Поллячека, емкостью пренебрегают, что допустимо на низких частотах. Далее рассчитываются потенциалы узлов и токи ветвей, при несовпадении которых с начальными значениями цикл повторяется.

Соответственно с учетом приближенного расчета индуктивности, отсутствия емкости и замедления сходимости итерационного процесса расчета стекающего тока с увеличением частоты данная модель ЗУ предназначена для анализа режимов КЗ в сетях переменного тока, но не для решения задач защиты СОДП от импульсного тока молниевых разрядов с частотой от 25 кГц и выше.

При использовании теории антенн ЗУ рассматривается как передающая антенна, создающая электромагнитное поле с напряженностями электрического E и магнитного поля H . Определение E и H производится при заданном токе антенны, однако вследствие интенсивного стекания тока в землю его распределение по элементам заземляющего устройства заранее неизвестно. Теорию антенн возможно применять для расчета простейших заземлителей, которые допускают аналитические расчеты продольного и стекающего тока.

Следовательно, в общем случае теорию антенн целесообразно использовать лишь совместно с теорией цепей, позволяющей рассчитать токи элементов в схемной модели ЗУ при заданных воздействиях.

Таким образом, из рассмотренных моделей для расчета ЗУ ни одна в полной мере не соответствует цели настоящей работы.

Цепно-полевая модель ЗУ

Среди последних достижений в области формализации описания электромагнитных процессов в проводниках с током наибольший интерес представляет цепно-полевая модель (ЦПМ) ЗУ, предложенная С.Л. Шишигиным [4], которая реализована с учетом всех электромагнитных связей между элементами для расчета и проектирования современных электростанций и подстанций была предложена.

Эта модель представляет интерес как инструмент решения поставленной в настоящей работе задачи.

Цепно-полевая модель ЗУ представляет собой многозвенную цепную схему, состоящую из симметричных П-четыреугольников, обладающих собственными продольными активно-индуктивными сопротивлениями и поперечными активно-емкостными проводимостями, а также гальваническими, индуктивными и емкостными взаимными связями (рис. 1). Топология цепи описывается матрицей соединений продольных ветвей А.

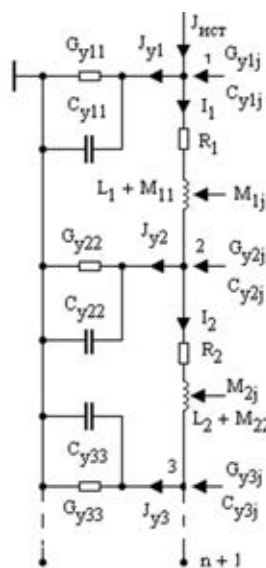


Рисунок 1 — Модель стержневого заземлителя (по С.Л. Шишигину): *J*_{ист} — задающий ток источника; *J*_у — поперечный ток узла (*J*_{у1} — поперечный ток 1 узла и т. п.); *I* — продольный ток ветви (*I*₁ — продольный ток 1 ветви и т. п.); *R* — продольное сопротивление ветви (*R*₁ — продольное сопротивление 1 ветви и т. п.); *G*_у — поперечная собственная проводимость элемента; *M* — взаимная индуктивность; *L* — собственная индуктивность продольной ветви (*L*₁ — собственная индуктивность 1 продольной ветви)

Для формирования модели выполнена дискретизация заземлителя на элементы длиной $l \leq \lambda/10 = \sqrt{10^5 \rho / f}$, где λ — длина электромагнитной волны частотой f в проводящей среде с удельным сопротивлением ρ [4]. Так, на эквивалентной частоте первого удара молнии $f = 25$ кГц длина элемента будет равна $l = 20$ м, для последующих ударов молнии ($f = 1$ МГц) длина элемента $l = 3$ м. Допустимая длина элемента уменьшается с увеличением частоты, но и область ЗУ, из которой

растекается ток, сужается, что ограничивает размерность расчетной модели

В ЦПМ ЗУ активное сопротивление и внутренняя индуктивность элементов (с учетом поверхностного эффекта) описывается диагональными матрицами R и L , а электрические и магнитные связи между элементами — матрицами собственных и взаимных проводимостей G , емкостей C , индуктивностей M . Матрицы проводимостей и емкостей получаются обращением $G = R^{-1}$, $C = \alpha^{-1}$. Элементы матриц вычисляются с учетом известной аналогии между статическими полями, поэтому для нахождения элементов матрицы M и α достаточно рассчитать матрицу сопротивлений R .

Вычисление потенциальных коэффициентов производится на основе векторных операций, инвариантных к расположению стержня относительно поверхности земли, а затем методом зеркальных изображений распространяется решение на двухслойную модель земли. Выражения потенциальных коэффициентов для однородной и двухслойной земли представлены в [5].

При найденном потенциальном коэффициенте между i -м и j -м элементом α_{ij} взаимное сопротивление и индуктивность рассчитываются, как показано в выражении (1)

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \rho \varepsilon \alpha_{ij}, \\ M_{ij} &= \mu_0 \varepsilon \alpha_{ij} (l_i l_j). \end{aligned} \quad (1)$$

При расчете индуктивности и емкости приняты следующие допущения: земля однородна ($\mu = \mu_0$, $\varepsilon > \varepsilon_0$), материалы ЗУ (μ , γ) постоянны, модель земли двухслойная горизонтально-слоистая с постоянными удельными сопротивлениями слоев, ЗУ состоит из элементов круглого сечения, длина которых больше диаметра, а источники поля (стекающие и продольные токи, заряды) сосредоточены на осях элементов, линейная плотность источников в пределах элемента постоянная.

Для определения ГС-параметров элементов ЗУ в узлах П-четыреугольников ЦПМ ЗУ производится эквивалентное преобразование матриц G , C , найденных методами теории поля в средних точках элементов, в узловые матрицы $\bar{G}_y$, $\bar{C}_y$ из условия неизменности стекающего тока элементов.

При формировании модели принято допущение, что поперечный ток каждого узла П-четыреугольника равен половине стекающего тока элемента, а потенциал элемента равен среднему потенциалу узлов моделирующего его четырехполюсника. С учетом этого топология продольных ветвей схемы (см. рис. 1) в рассматриваемой ЦПМ ЗУ описывается матрицей соединений A и матрицей B ($b_{i,j} = |a_{ij}|/2$), позволяющей связать стекающие токи элементов J с поперечными токами J_y узлов четырехполюсников $J_y = B \cdot J$, а также потенциалы средних точек элементов φ с потенциалами U узлов четырехполюсников ($\varphi = B^T \cdot U$).

Формулы приведения матриц емкости и проводимости, найденных в средних точках элементов ЗУ, к узловым матрицам, записываются в следующей форме:

$$C_y = B \cdot C \cdot B^T; \quad G_y = B \cdot G \cdot B^T. \quad (2)$$

Таким образом, выполняется эквивалентный перенос матриц емкостей и проводимостей, найденных методами теории поля в средних точках элементов, в узлы схемы замещения.

В установившемся режиме расчет ЦПМ ЗУ производится методом узловых потенциалов (но может быть использован и другой метод), для расчета переходных процессов растекания тока молнии используется операторный метод.

Таким образом, ЦПМ ЗУ обеспечивает корректное вычисление собственных и взаимных индуктивностей (емкостей и проводимостей) элементов ЗУ методами теории поля, а на их основе и волновых параметров.

Выводы

Организация и функционирование ЗУ в системах обеспечения движения поездов на железных дорогах имеют существенные отличительные признаки по сравнению с энергетическими объектами, для которых задачи моделирования ЗУ проработаны более полно.

В качестве перспективной конструкции ЗУ предлагается использовать в СОДП модульно-стержневые заземлители с цинковым антикоррозионным покрытием, выполненным по термодиффузионной технологии.

На основе результатов анализа различных подходов к описанию ЗУ можно сделать заключение, что цепно-полевая модель позволяет корректно учитывать все виды электромагнитных связей (гальванических, индуктивных, емкостных) между элементами, и поэтому ее следует рассматривать как наиболее рациональную для решения задач расчета заземляющего устройства СОДП в широком диапазоне частот для произвольной конфигурации ЗУ с гальваническими (в том числе через землю при наличии сторонних заземленных коммуникаций) и электромагнитными связями.

Литература

1. Костроминов А.М., Костроминов А.А., Бирюков А.П. Влияние молнии на устройства кодовой автоблокировки // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 8. С.16—19.
2. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
3. Костенко М.В., Гумерова Н.И., Данилин А.Н., Ефимов Б.В. и др. Волновые процессы и перенапряжения в подземных линиях. СПб.: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
4. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств: сб. докл. третьей рос. конф. по заземляющим устройствам. Новосибирск: Сибирск. энерг. академия, 2008. С. 29—38.
5. Шишигин С.Л. Векторная форма записи потенциала стержневого заземлителя в однородной и двухслойной земле // Электричество. 2007. № 7. С. 22—27.

References

1. Kostrominov A.M., Kostrominov A. A., Birjukov A.P. Vliyanie molnii na ustrojstva kodovoj avtoblokirovki [Lightning effect on coded current block devices] // Avtomatika, svjaz', informatika. 2011. № 8. S.16 – 19.
2. Burgsdorf V.V., Jakobs A.I. Zazemljajušie ustrojstva elektroustanovok [Grounding devices of electrical installations] M.: Energoatomizdat, 1987. 400 s.
3. Volnovye protsessy i perenaprjazhenija v podzemnykh linijakh [Wave processes and overloads in underground power lines] / M.V. Kostenko, N.I. Gumerova, A.N. Danilin, B.V. Efimov i dr. SPb.: Jenergoatomizdat, 1991. 232 s.
4. Shishigin S. L. Matematicheskie modeli i metody rascheta zazemljajushchikh ustrojstv [Mathematical models and calculation methods of grounding devices] // Sb. dokl. /Tretja Rossijskaja konf. po zazemljajušim ust-rojstvam: Novosibirsk: Sibirsk. energ. akademija, 2008. S.29 – 38.
5. Shishigin S.L. Vektornaja forma zapisi potentsiala sterzhnevoego zazemlitelja v odnorodnoj i dvukhslojnoj zemle [Vector form of record of framing grounding potential in homogeneous and two-layer ground]// Elektrichestvo. 2007. № 7. S.22 – 27.

УДК 621.336

Николай Владимирович Раевский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ), Чита,
Виталий Геннадьевич Дурнов, ассистент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ), Чита

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ КРАТКОСРОЧНОМ ПЕРИОДЕ УПРЕЖДЕНИЯ

Nikolay V. Raevsky, PhD, associate professor of 'Electric power supply' chair of ZabIZHT,
Vitaliy G. Durnov, assistant of 'Electric power supply' chair of ZabIZHT

Choice Of Optimal Method On Forecasting Times Series Electricity Consumption By Short-Term Anticipated Period

Аннотация

На основе системного анализа решена задача по увеличению точности прогнозирования электропотребления железнодорожным транспортом. Рассмотрено применение метода анализа иерархий для решения задач выбора оптимальной методики прогнозирования электропотребления временных рядов. Предложена система критериев и алгоритм выбора оптимальной методики прогнозирования в зависимости от поступающей информации. Определена оптимальная методика прогнозирования временных рядов электропотребления при краткосрочном периоде упреждения. Рассмотренный подход к задачам прогноза тягового электропотребления в ОАО «РЖД» позволяет сократить издержки при покупке электрической энергии.

Ключевые слова: временной ряд электропотребления, метод прогнозирования, железнодорожный транспорт, алгоритм, метод анализа иерархий.

Annotation

The problem of increasing the accuracy of forecasting railway transport electricity consumption on the basis of systems analysis is solved. The application of the hierarchy analysis method for solving problems of choosing the optimal methods on forecasting the time series electricity consumption is considered. The system of criteria and the algorithm of choosing the optimal forecasting method depending on the receiving data are offered.

It is identified the optimal method of forecasting times series electricity consumption by short-term anticipated period. The considered approach to the train traction electricity consumption forecasting in JSC 'Russian railways' allows to reduce expenses on electricity purchase.

Key words: times series electricity consumption, forecasting method, railway transport, algorithm, hierarchy analysis method.

Введение. Железнодорожный транспорт в период перехода России на рыночную экономику претерпел значительные перемены в принципах организации своей деятельности. Рыночный отпуск электрической энергии (ЭЭ) по заявкам потребителя в настоящее время приобретает все более массовый характер. В свою очередь, железнодорожный транспорт находится в числе крупных потребителей, приобретающих электрическую энергию на оптовом рынке. Свыше 4,5% потребляемой в стране электроэнергии идет на тягу поездов. Это составляет около 70 млрд кВт·ч в год. Однако при таком подходе первая необходимость заключается в выборе оптимальной тактики поведения на рынке, а также проведения квалифицированного анализа и детального планирования электропотребления (ЭП).

Планирование электропотребления железнодорожным транспортом производится с участием администратора торговой системы НП «АТС». При составлении заявок на рынке электроэнергии к потребителям повышаются требования к надежности и достоверности результатов планирования ЭП. Это требует решения сложной задачи выбора оптимальной методики прогнозирования в зависимости от исходных данных. Величина нормативного уровня отклонений прогнозного значения для покупателя устанавливается в размере 2%, но приемлемым диапазоном для предприятия, не несущего существенных издержек, можно считать $\pm 5\%$ [1]. В этих условиях появляется возможность заключать договоры на приобретение энергоресурсов у поставщиков ЭЭ по льготным тарифам. При этом наиболее высокие требования предъявляются к краткосрочным и оперативным прогнозам, поскольку именно они определяют управление текущим режимом работы энергосистемы.

Будущее потребление ЭЭ можно определять не только на базе статистических данных и некоторого учета факторов влияния, а рассчитать точно, по правильным алгоритмам. Данный подход предполагает разработку математической модели выбора оптимальной методики прогнозирования (ВОМП) электропотребления в зависимости от имеющейся исходной информации.

Математическая постановка задачи. Несмотря на большое число влияющих факторов, можно выделить основные этапы прогнозирования временных рядов электропотребле-

ния при краткосрочном периоде упреждения, представленные в виде блок-схемы на рис. 1.

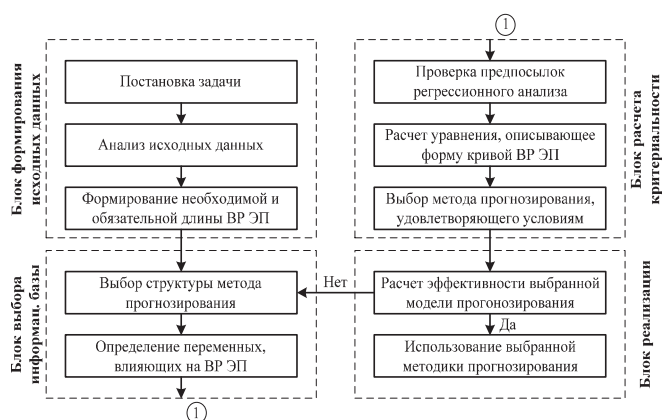


Рисунок 1 — Процесс выбора оптимальной методики прогнозирования

Процесс принятия решения по выбору оптимальной методики прогнозирования временных рядов (ВР) электропотребления — это многоуровневая процедура. Г. Саймон [2] выделяет в нем три этапа: поиск информации, поиск и нахождение альтернатив и выбор лучшей альтернативы. На первом этапе собирается вся доступная на момент принятия решения информация: фактические данные, мнения экспертов. По возможности строятся математические модели; определяются взгляды на проблему с определением критериев выбора. Второй этап связан с определением того, что можно, а что нельзя делать в имеющейся ситуации, т. е. с определением вариантов решений (альтернатив). И уже третий этап включает в себя сравнение альтернатив и выбор наилучшего варианта решения.

При построении алгоритма ВОМП для краткосрочного периода упреждения было выявлено, что первые блок формирования исходных данных и блок выбора информационной базы имеют аналогичную описанной в литературе [3] структуру с оперативным периодом упреждения.

Процесс выбора оптимальной методики прогнозирования временных рядов электропотребления неразрывно связан с системой критериев (период упреждения; длина ВР; наличие многофакторной природы, сезонности, инертности и т. д.), подлежащих тщательному анализу. Для иерархического представления и последующего структурирования многокритериальных альтернатив путем поэтапного установления приоритетов применяется модифицированный метод анализа иерархии (ММАИ).

Сущность метода состоит в следующем. Имеется некая цель и совокупность одновременно реализуемых методов (решаемых задач), которые обеспечивают достижение этой цели [4]. Указанная цель декомпозируется на ряд подцелей и критериев (условий), выполнение которых обеспечивает достижение поставленной цели. Выбранные критерии попарно сравниваются между собой, и по девятибалльной системе определяется относительная степень важности каждого критерия в паре. На основе полученной матрицы сравнений определяется относительная величина степени важности каждого из критериев для достижения поставленной цели в целом. Аналогичным способом, путем попарного сравнения, для каждого критериев формируются матрицы методов, на основе которых определя-

ется степень соответствия каждого метода каждому из критериев. В дальнейшем с учетом степени важности каждого критерия определяется вклад (весовой коэффициент) каждого из методов для достижения поставленной цели.

На практике не существует установленной процедуры генерирования целей, критериев и видов деятельности для включения в иерархию. Это зависит от тех целей, которые выбираются для декомпозиции сложной системы.

Иерархическое представление системы используется для описания того, как влияют изменения приоритетов на верхних уровнях на приоритеты элементов нижнего уровня и наоборот, а также предоставляет более подробную информацию о структуре и функции системы на нижних уровнях и обеспечивает рассмотрение факторов и их целей на высших уровнях.

Применение ММАИ в решениях задач прогнозирования временных рядов электропотребления для выбора оптимальной методики одним из направлений применения данного алгоритма.

Пусть $C_1, C_2, \dots, C_n$ — совокупность объектов (возможных действий). Количественные суждения о парах объектов (C_i, C_j) представляются матрицей размера $n \times n$

$$A = (a_{ij}), i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Элементы a_{ij} определены по следующим правилам.

Правило 1. Если $a_{ij} = a$, то $a_{ji} = 1/a, a \neq 0$.

Правило 2. Если суждения C_i имеют одинаковую с C_j относительную важность, то $a_{ij} = 1, a_{ji} = 1$; в частности, для всех i . Итак, матрица A имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

После представления количественных суждений о парах (C_i, C_j) в числовом выражении через a_{ij} задача сводится к тому, чтобы n возможным действиям $C_1, C_2, \dots, C_n$ поставить в соответствие множество числовых весов $w_1, w_2, \dots, w_n$, которые соответствовали бы зафиксированным суждениям.

Для этого необходимо нечетко сформулированной задаче придать строгую математическую форму. Этот существенный шаг является наиболее важным в задаче. На каждом уровне строящиеся матрицы парных сравнений основываются на шкале, представленной в табл. 1.

Таблица 1 — Шкала сравнения альтернатив

Степень важности	Определение
1	Одинаковая значимость
3	Слабая значимость
5	Существенная или сильная значимость
7	Очень сильная значимость
9	Абсолютная значимость
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения

Следующий шаг состоит в вычислении вектора приоритетов K_i по данной матрице. В математических терминах это вычисление главного собственного вектора, который после нормализации становится вектором приоритетов. Каждая составляющая вектора указывает, какой сравнительной значимостью обладает данный элемент в отношении рассматриваемого элемента более

высокого уровня. Алгоритм вычисления состоит в следующем. Вычисляются компоненты собственного вектора матрицы

$$a_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Далее определяются нормализованные оценки вектора локальных приоритетов первого уровня

$$K_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Процедура ограниченности оценок приоритетов необходима, так как не всегда можно исходить из ограниченности всех оценок. Индекс согласованности в каждой матрице и для всей иерархии может быть получен путем несложных математических вычислений. Сначала суммируется каждый столбец матрицы, затем сумма первого столбца умножается на величину первой компоненты нормализованного вектора приоритетов, сумма второго столбца — на вторую компоненты и т. д. Затем полученные числа суммируются. Таким образом, можно получить величину, характеризующую наибольшее собственное значение каждой матрицы и обозначаемую $\lambda_{\max}$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n Y_i, \text{ где } Y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot K_j. \quad (5)$$

Индекс согласованности (ИС) определяется по формуле

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (6)$$

где n — число сравниваемых элементов.

Индекс согласованности сравнивается со случайным индексом (СИ), представленном в табл. 2.

Таблица 2 — Шкала индексов

Порядок матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
СИ	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Отношение ИС к среднему СИ для матриц того же порядка называют отношением согласованности (ОС). Значение $ОС \leq 0,1$ считается приемлемым, а для матриц с $ОС \geq 0,1$ следует проводить проверку и пересмотр оценок сравнения пар. Проверка ограниченности оценок приоритетов производится для всех матриц сравнения пар.

Результатом сравнения пар является вектор взвешивания для непосредственно подчиненного главной цели уровня, который характеризует значимость соответствующих целевых критериев относительно главной цели, представляющий собой глобальный приоритет. Этот вектор взвешивания — начало определения глобальных приоритетов для элементов последующего уровня. Он умножается на матрицу весов, составляемую из вектора взвешивания последующих уровней. Результатом этого является вектор взвешивания, представляющий для элементов последующего уровня их глобальный приоритет. Последовательное продолжение данной операции ведет к определению глобального приоритета для альтернатив, учтенных на самом нижнем уровне иерархии целей. Процесс определения глобальных приоритетов для альтернативы i можно интерпретировать как величину полезности b_i , рассчитываемую по формуле

$$b_i = \sum_{j=1}^n K_j \cdot K_j^i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

где i — элемент следующего вышестоящего уровня;
 K_j — глобальный приоритет этих целевых критериев;
 K_j^i — относительная значимость альтернативы j .

Таким образом, глобальный приоритет определяется как сумма частных приоритетов, представляющих собой веса в отношении целевых критериев. Они характеризуют учет на низшем уровне альтернатив для достижения главной цели.

Практическое применение ММАИ. Общей целью исследования в области прогнозирования временных рядов электропотребления железнодорожным транспортом является выбор оптимальной методики прогнозирования в зависимости от поступающей информации. В соответствии с разработанным алгоритмом выбора оптимальной методики для краткосрочного периода упреждения были определены основные критерии выбора, влияющие на результат поставленной цели. Это длина эволюционного цикла (ДЦ), глубина периода упреждения (ГУ), многофакторная природа (МП), коэффициент корреляции (КК), коэффициент детерминации (КД), наличие автокорреляции (А), наличие сезонности (С), наличие инертности (И), выполнение предпосылок регрессии (ВП) и наличие неравномерности временного ряда (НР). Каждый критерий влияет на альтернативы, представляющие собой методы прогнозирования. Это адаптивный метод (АМ), нейронные сети (НС), регрессионная модель (РМ), авторегрессионная модель (АР), имитационная моделирование (ИМ), сингулярно-спектральный анализ (ССА), экспоненциальное сглаживание (ЭС), метод Хольта — Уинтерса (ХУ), метод Бокса — Джексона (БД), модифицированный метод Брауна (МБ) и метод Харрисона (МХ).

После анализа данных методов прогнозирования по рис. 1, была построена иерархическая структура с несколькими уровнями: цель — альтернативы — критерии, представленная на рис. 2.

В соответствии с (2) матричная форма влияния друг на друга критериев имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} & \text{ДЦ} & \text{ГУ} & \text{МП} & \text{КК} & \text{КД} & \text{А} & \text{С} & \text{И} & \text{ВП} & \text{НР} \\ \text{ДЦ} & 1 & 3 & 3 & 5 & 7 & 9 & 9 & 8 & 8 & 8 \\ \text{ГУ} & 1/3 & 1 & 3 & 3 & 4 & 5 & 5 & 7 & 7 & 8 \\ \text{МП} & 1/3 & 1/3 & 1 & 5 & 5 & 3 & 5 & 4 & 9 & 9 \\ \text{КК} & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ \text{КД} & 1/7 & 1/4 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ \text{А} & 1/9 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ \text{С} & 1/9 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 3 & 3 \\ \text{И} & 1/8 & 1/7 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 3 \\ \text{ВП} & 1/8 & 1/7 & 1/9 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 \\ \text{НР} & 1/8 & 1/8 & 1/9 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

На основании расчетов компонентов собственного вектора матрицы в соответствии с алгоритмом расчета величина $\lambda_{\max}$ равна 15,58.

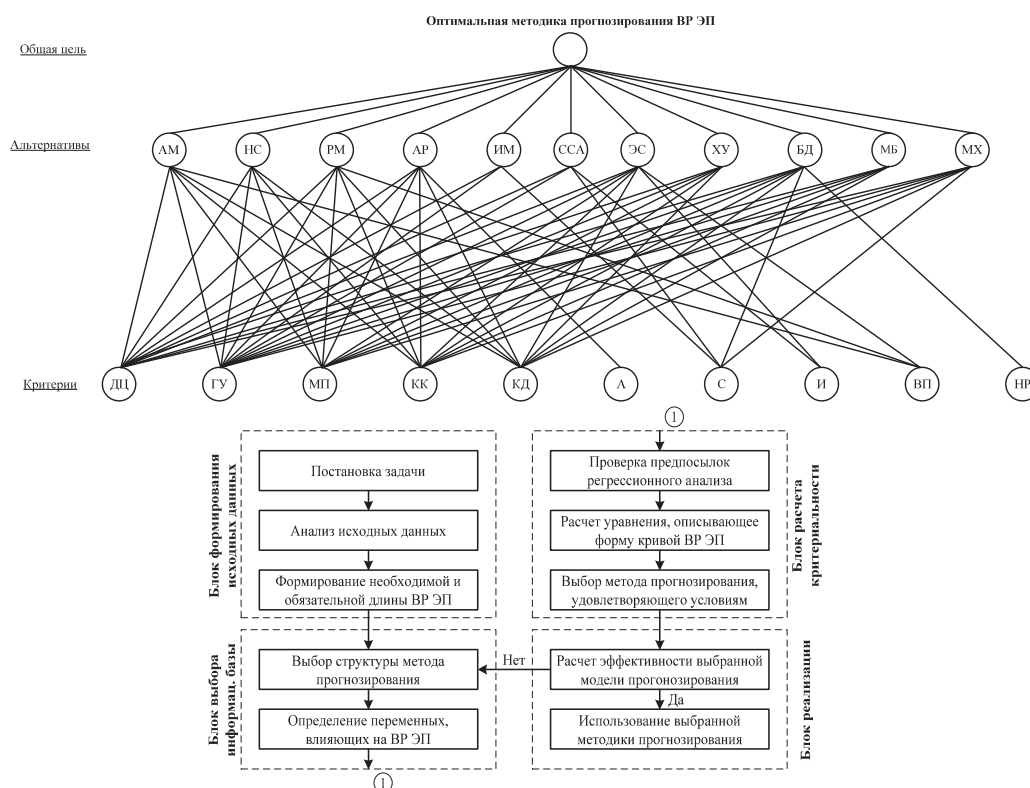


Рисунок 2 — Иерархическая структура достижения общей цели

В соответствии с (6) индекс согласованности определяется отношением

$$ИС = \frac{11,05 - 10}{10 - 1} = 0,12. \quad (9)$$

Так как порядок матрицы равен 10, то СИ равен 1,49, значит,

$$ОС = \frac{ИС}{СИ} = \frac{0,12}{1,49} = 7,84\%. \quad (10)$$

Величина ОС = 7,84% является приемлемым значением, так как в соответствии с вышенаписанным утверждением находится в пределах 10%.

Следующий этап заключается в сравнении заданных альтернатив по каждому критерию отдельно. Для этого составляются матрицы по вышеприведенному алгоритму и определяются весовые коэффициенты альтернатив для каждого критерия.

Итоговая матрица весовых коэффициентов альтернатив для каждого критерия (11) имеет следующий вид:

	ДЦ	ГУ	МП	КК	КД	А	С	И	ВП	НР	b_i
АМ	1,01	0,97	1,00	1,37	1,37	0,98	1,07	1,07	1,03	0,99	12,13
НС	1,01	0,97	1,00	1,44	1,44	0,98	1,02	1,02	1,08	0,99	12,25
РМ	1,01	0,97	1,02	1,00	1,00	0,98	1,08	1,08	1,03	0,99	11,22
АР	1,01	0,91	1,29	1,14	1,14	0,98	1,11	1,11	1,15	0,99	12,06
ИМ	1,04	1,12	1,04	0,96	0,96	1,21	1,02	1,02	1,13	0,99	11,58
ССА	1,10	1,07	1,05	1,40	1,40	1,21	1,02	1,02	1,13	0,99	12,74
ЭС	0,99	1,07	1,17	0,94	0,94	0,98	1,08	1,08	1,03	1,31	11,60
ХУ	1,06	1,07	0,99	1,02	1,02	0,93	0,93	1,03	1,03	1,21	11,27
БД	1,06	1,07	0,99	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	11,32
МБ	1,06	1,07	0,99	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	11,32
МХ	1,06	1,07	0,99	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	0,99	11,32

Наилучшей методикой краткосрочного прогнозирования временных рядов электропотребления железнодорожного транспорта является сингулярно-спектральный анализ с величиной полезности, равной 12,74.

На рис. 3 представлено графическое соотношение результатов прогнозирования тягового электропотребления для краткосрочного периода упреждения оптимальной методики сингулярно-спектрального разложения (погрешность прогнозирования лежит практически в пределах интервала $\pm 2\%$) и методики регрессионного анализа, показавшей наименьшую величину полезности, равную 11,22 (погрешность в интервале $\pm 7\%$), что не удовлетворяет требованиям работы на рынках электрической энергии.

Выводы

Модифицированный метод анализа иерархий применим для решения оптимизационных задач прогнозирования временных рядов электропотребления при краткосрочном периоде упреждения.

Предложена система критериев и алгоритм выбора оптимальной методики прогнозирования ВР ЭП в зависимости от исходной информации для краткосрочного периода упреждения.

Оптимальной методикой прогнозирования временных рядов электропотребления для краткосрочного периода упреждения является метод сингулярно-спектрального анализа временных рядов.

Погрешность прогнозирования тягового электропотребления методом сингулярно-спектрального разложения удовлетворяет требованиям работы на рынках ЭЭ.

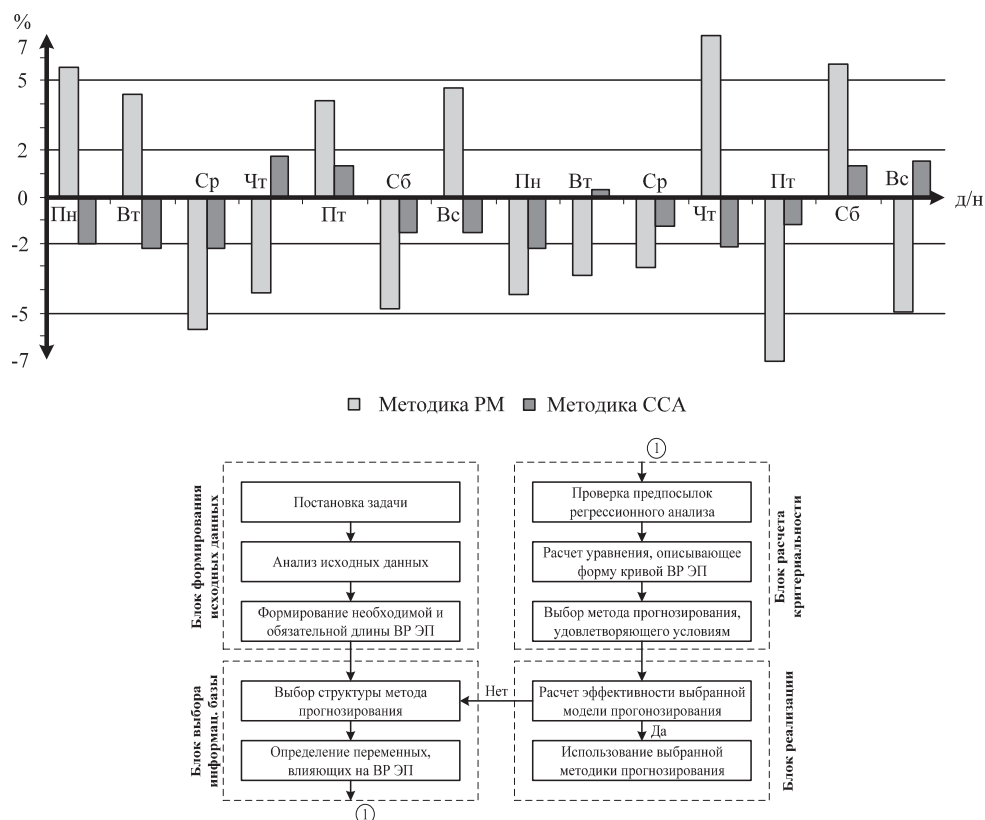


Рисунок 3 — Погрешность при прогнозировании временных рядов ЭП

Литература

1. Дурнов В.Г., Раевский Н.В., Яковлев Д.А. Прогнозирование электропотребления // Современные техника и технологии : труды XV Международ. науч.-практ. конф. Т. 1. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 613 с.
2. Simon H.A. The new science of management decision. N.Y. : Harper and Row Publishers, 1960.
3. Раевский Н.В., Яковлев Д.А., Дурнов Д.Г. Выбор оптимальной методики прогнозирования временных рядов электропотребления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 3 (31).
4. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993.

References

1. Durnov V. G., Raevskij N. V., Yakovlev D. A. Prognozirovanie elektropotreblenija [Electricity consumption forecasting] // Sovremennye tekhnika i tekhnologii: Trudy XV Mezhd. nauchno-prakt. konf v 3-h tomakh. T.1. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. 613 s.
2. Simon H. A. The new science of management decision. N. Y.: Harper and row publishers, 1960.
3. Raevskij N. V., Yakovlev D. A., Durnov D. G. Vybora optimalnoj metodiki prognozirovanija vremennykh rjadov elektropotreblenija [Choice of optimal method of forecasting times series electricity consumption]// Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2011. № 3 (31).
4. Saati T. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij. [Decision making. Hierarchy analysis method]. M.: Radio i svjaz, 1993.

УДК 621.85

Петр Витальевич Яковлев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск

Геннадий Дмитриевич Драгунов, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСМИССИИ АВТОМОБИЛЯ «УРАЛ» С НОВОЙ РАЗДАТОЧНОЙ КОРОБКОЙ

Petr V. Yakovlev, PhD, associate professor of «Motor vehicles» chair, South Ural State University,
Gennady D. Dragunov, DSc, professor of «Motor vehicles» chair, South Ural State University

Mathematical Modeling Of Transmission Of 'Ural'car With A New Transfer Case

Аннотация

Нелинейность и неголономность связей является весьма сложным вопросом в задачах динамики трансмиссии автомобилей. Поэтому при их решении для инженерной практики актуально применение приближенных методов расчета. Один из таких методов основан на применении уравнения Лагранжа второго рода, с помощью которого разработана математическая модель трансмиссии полноприводного автомобиля-тягача типа «Урал» с новой раздаточной коробкой.

Ключевые слова: автомобиль, трансмиссия, раздаточная коробка, математическая модель, уравнение Лагранжа.

Annotation

Non-linearity and non-holonomic constraints are very complex issues in the problems of cars' transmission dynamics. Therefore, in the process of their solution it is relevant for engineering practice to use approximate methods of calculation. One of these methods is based on applying Lagrange equations of the second kind with which help it is developed the mathematical model of transmission of a four-wheel drive vehicle 'Ural' with a new transfer case.

Key words: car, transmission, transfer case, the mathematical model, Lagrange equation.

Развитие вычислительной техники, создание мощных ЭВМ коснулось и методик проектирования и расчета трансмиссий автомобилей. Исчезли существовавшие ранее сложности в реализации численных методов теории колебаний, теории упругости и др. Вместе с тем уточненные методы проектирования и расчета трансмиссий автомобилей показали, что в некоторых случаях существовавшие приближенные методы дают достаточную для инженерной практики точность. При этом разрабатываемые образцы новой автомобильной техники также нуждаются в простых и эффективных вычислительных инструментах. Это побуждает изыскивать новые приближенные подходы к оценке нагруженности трансмиссий, включая определение напряженно-деформированного состояния ее деталей и характера формирования нагрузочного режима в различных эксплуатационных условиях.

Сложность разработки приближенных методов расчета заключается в том, что во многих случаях явления, происходящие в механических системах, в частности в трансмиссиях автомобилей, описываются нелинейными моделями. Возникновение нелинейности может быть обусловлено различными факторами. Перечислим наиболее значимые из них [1].

1. Нелинейность упругих характеристик отдельных звеньев механизма, таких как муфты с фасонными пружинами; резиновые и шинно-пневматические муфты; шариковые подшипники. Такая нелинейность может быть вызвана нелинейными свойствами самого материала (например, резины), не подчиняющегося закону Гука, или наличием зазоров в соединениях деталей механизма, например в зубчатых зацеплениях.

2. Нелинейность сил сопротивления. Существенно нелинейными являются многие силы внутреннего трения в материалах. Действие этих сил выражается в так называемых гистерезисных потерях энергии при деформации соответствующих элементов. Именно эти диссипативные свойства

приводят к уменьшению амплитуд колебания механических систем.

3. Нелинейность внешних сил, нагружающих рабочие органы машины, например зависимость силы сопротивления резания металлов от скорости резания.

4. Нелинейность механических характеристик двигателя, обусловленная механическими характеристиками различных типов двигателей, узлов и механизмов.

5. Нелинейность процессов движения, возникающая, например, при отрыве колес от поверхности качения.

6. Нелинейность, обусловленная переменностью параметров системы. Примерами таких систем являются системы с переменной массой или с изменяющимся при движении моментом инерции.

В работе [2] по проектированию и расчету механических бесступенчатых нефрикционных передач непрерывного действия наряду с нелинейными динамическими системами рассматривают и так называемые неголономные системы, т. е. системы, в которых ограничения, наложенные на скорости или перемещения точек, не могут быть сведены к ограничениям (связям), наложенным на взаимные положения точек, т. е. уравнения, связывающие обобщенные скорости, неинтегрируемы и не могут быть представлены в конечном виде [3],

$$F(t, q_j) = 0 \quad (j=1, \dots, n), \quad (1)$$

где n — число координат q_j , определяющих положение системы в пространстве.

Исторически первой общей формой уравнений неголономной механики следует считать уравнения Феррера с неопределенными множителями $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ (1871 г.) [3]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i + \sum \lambda_j \frac{\partial f_j}{\partial q_i}. \quad (2)$$

В уравнении (2) T — кинетическая энергия, Q_i — обобщенные силы, а λ_j — неопределенные множители, которые, вообще говоря, однозначно восстанавливаются из условий связи $f_j(q, \dot{q}) = 0$.

Основное отличие неголономной механики от обычной лагранжевой состоит в том, что уравнения связей, записанные через обобщенные координаты q_j и обобщенные скорости $\dot{q}_j$ в виде

$$f_i(q, \dot{q}, t) = 0, \quad i = 1, \dots, k, \quad q = (q_1, \dots, q_n),$$

не могут быть представлены в конечном (интегральном) виде

$$F_i(q, t) = 0.$$

Кроме уравнений Феррера в неголономной механике используются также уравнения Аппеля, Чаплыгина, Маджи, Вольтерра, Больцмана — Гамеля. Такое разнообразие форм уравнений, вообще говоря, не является значительным продвижением. Все эти формы связаны с различными способа-

ми исключения неопределенных множителей и на практике, как правило, не используются. При составлении конкретных уравнений движения, связанных, например, с качением, обычно пользуются общими уравнениями динамики или универсальными уравнениями в форме (2) [3]. Более того, авторы работы [3] указывают на «свое негативное отношение к излишнему современному формализму в динамике, который, вообще говоря, связан с ее недавней бурбакизацией». Как и во всей математике, механике и в обсуждаемой области, такого сорта методы почти ни к чему не привели». В качестве подтверждения авторы [3] отмечают, что «например, С.А. Чаплыгин, получивший общую форму уравнений неголономной механики, носящей его имя, при решении конкретных неголономных задач (принесших ему мировую известность) пользовался не этими уравнениями, а общими принципами динамики. С другой стороны, известный киевский механик П.В. Воронец, также получивший общие динамические неголономные уравнения, кстати говоря, имеющие очень громоздкую форму, настойчиво старался использовать их при изучении конкретных систем. К сожалению, во многих случаях это привело лишь к неоправданному усложнению в анализе и, видимо, только препятствовало открытию новых динамических результатов». Эти высказывания и мнения нашли отображение в широко известных работах И.С. Цитовича, В.Б. Альгина, В.Я. Павловского, С.Н. Поддубко [4, 5], а также в работах А.И. Свитаева [6], В.Г. Киршина [7], Н.С. Прасолова [8], П.В. Яковлева [9] и многочисленных работах других авторов, которые для исследования нагруженности трансмиссии автомобиля составляли систему дифференциальных уравнений на основании уравнения Лагранжа второго рода. Поэтому при составлении динамической схемы и разработки математической модели трансмиссии полноприводного автомобиля-тягача типа «Урал» с новой раздаточной коробкой (РК), конструкция которой описана в работе [10], приняты следующие допущения:

- связи системы голономны;
- в качестве основных источников нелинейности рассматриваем буксование сцепления, а также буксование и проскальзывание ведущих колес;
- трансмиссия автомобиля-тягача является системой с распределенными параметрами, в которой каждый элемент характеризуется двумя свойствами — инерционностью и податливостью;
- обычно при схематизации трансмиссия представляется в виде колебательных систем с дискретными параметрами;
- основанием для дискретизации является то, что крутильные колебания в трансмиссии имеют выраженный дискретный спектр собственных колебаний (частот) в диапазоне до 300 Гц, поэтому дискретные системы пригодны для расчета колебательных процессов в этом диапазоне;
- в системах, приведенных к дискретному виду, все детали заменяются элементами, каждый из которых характеризуется только одним из параметров: инерционностью или податливостью;
- дискретизация системы производится путем выделения элементов, относящихся к сосредоточенным массам, и элементов, обладающих только податливостью;

— инерционными элементами (сосредоточенными массами) считают такие, осевой размер которых не превышает 1,5—2 их диаметра;

— элементами, обладающими только податливостью, считают в первую очередь валы и оригинальные упругие детали.

На основании перечисленных допущений для решения поставленных задач была разработана плоская расчетная схема (рис. 1), отражающая динамику трансмиссии полноприводного автомобиля-тягача с тремя ведущими мостами. Обозначения, принятые на рис. 1, сведены в табл. 1. Совершенно ясно, что полученная модель, собственно, как и все модели, в итоге даст решение с некоторой погрешностью, т. е. приближенное. Однако по опыту исследований работы [9], в которой рассматривалась модель аналогичной трансмиссии, можно ожидать погрешность вычислений не более 10%.

Таблица 1 — Обозначения, принятые на рис. 1

J_d	момент инерции движущихся масс двигателя, маховика и ведущих элементов фрикционного сцепления;
J_A	момент инерции поступательно движущегося автомобиля;
J_2	приведенный момент инерции к выходному валу коробки передач (КП);
J_3	момент инерции первичного вала и шестерен привода РК;
J_4	приведенный момент инерции вала РК;
J_5	приведенный момент инерции межосевого дифференциала с ведомыми валами РК;
J_6	приведенный момент инерции среднего и заднего моста с приводом;
J_7	приведенный момент инерции переднего моста с приводом;
e_{12}	приведенная податливость элементов трансмиссии к выходному валу КП;
e_{23}	приведенная податливость элементов трансмиссии к первичному валу РК;
e_3	податливость водила;
e_{56}	приведенная податливость элементов привода среднего и заднего моста к первичному валу РК;
e_{57}	приведенная податливость элементов привода переднего моста к первичному валу РК;
$M_{\phi 1}$	момент сцепления колес среднего и заднего моста с дорогой;
$M_{\phi 2}$	момент сцепления колес переднего моста с дорогой;
$M_{об}$	крутящий момент двигателя;
M_a	крутящий момент от сил сопротивления движению автомобиля;
M_n	крутящий момент от силы на рычаге переключения передач в РК;
K_1, K_2, K_3, K_4, K_5	демпферы крутильных колебаний соответственно в сцеплении, привода РК, механизма фиксации передачи, привода задних колес с учетом демпфера в шинах, привода передних колес с учетом демпфера в шинах.

Таким образом, получена восьмимассовая система, приведенная к первичному валу раздаточной коробки, при этом собственная частота системы определяется уравнением [8]

$$\omega^n + b_1 \omega^{n-2} + b_2 \omega^{n-4} + \dots + b^n = 0, \quad (3)$$

где ω — собственная частота колебаний системы;

n — число приведенных масс в системе;

$b_1, b_2, \dots, b_n$ — коэффициенты частотных уравнений.

Заметим, что J_3, J_4, J_5 (см. рис. 1), несмотря на их относительную малость, не объединены с другими моментами инерции, так как они описывают собой водило раздаточной коробки, характеристики которых мы определяем как

$$\left. \begin{aligned} J_3 \ddot{\phi}_3 + \frac{1}{e_{12}}(\phi_1 - \phi_2) + K_1(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) &= M_{об}; \\ J_2 \ddot{\phi}_2 - \frac{1}{e_{12}}(\phi_1 - \phi_2) + \frac{1}{e_{23}}(\phi_2 - \phi_3) + K_2(\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3) &= 0; \\ J_3 \ddot{\phi}_3 + \frac{(\phi_3 + a\phi_5 - (1+b)\phi_4)}{e_3 e_5} \frac{1}{e_3 e_5} &= \frac{1}{e_{23}}(\phi_2 - \phi_3); \\ J_4 \ddot{\phi}_4 - \frac{(\phi_3 + a\phi_5 - (1+b)\phi_4)}{e_3 e_5} \frac{1}{e_3 e_5} &= M_a; \\ J_5 \ddot{\phi}_5 + \frac{(\phi_3 + a\phi_5 - (1+b)\phi_4)}{e_3 e_5} \frac{1}{e_3 e_5} &= \frac{1}{e_{56}}(\phi_5 - \phi_6) + \frac{1}{e_{57}}(\phi_5 - \phi_7) + K_4(\dot{\phi}_5 - \dot{\phi}_6) + K_5(\dot{\phi}_5 - \dot{\phi}_7); \\ J_6 \ddot{\phi}_6 - \frac{1}{e_{56}}(\phi_5 - \phi_6) + M_{\phi 1} &= 0; \\ J_7 \ddot{\phi}_7 - \frac{1}{e_{57}}(\phi_5 - \phi_7) + M_{\phi 2} &= 0; \\ J_a \ddot{\phi}_a - M_{\phi 1} - M_{\phi 2} + M_a &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В системе дифференциальных уравнений (4) b — передаточное отношение солнце — эпицикл при заторможенном водиле для планетарного механизма с плоским одноосевым сателлитом, a — передаточное отношение шестерни межосевого дифференциала и шестерни входного вала.

Процесс переключения передач в новой раздаточной коробке можно разделить на три этапа: 1-й этап начинается в момент расцепления водила и заканчивается в момент выхода паразитной шестерни выключаемой передачи из зацепления с выходным валом; 2-й этап начинается в момент входа в зацепление с выходным валом паразитной шестерни выключаемой передачи и заканчивается в момент водила — начинается 3-й этап.

На 3-м этапе в четвертом уравнении системы (4), описывающем поведение водила, добавляются величина $C_4 \cdot \phi_{4r}$, характеризующая реактивное звено, и величина $K_3 \phi_3$, характеризующая демпфер, а величина M_a , описывающая усилие на рычаге управления, исключается (рис. 2).

Система уравнений (4) составлена для 3-го заключительного и, как показали расчеты, наиболее нагруженного этапа переключения.

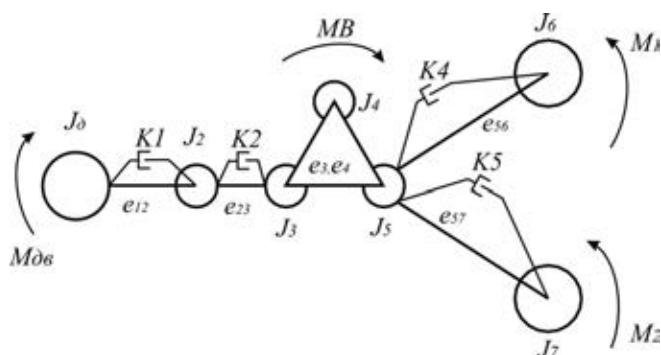


Рисунок 1 — Первый и второй этапы переключения

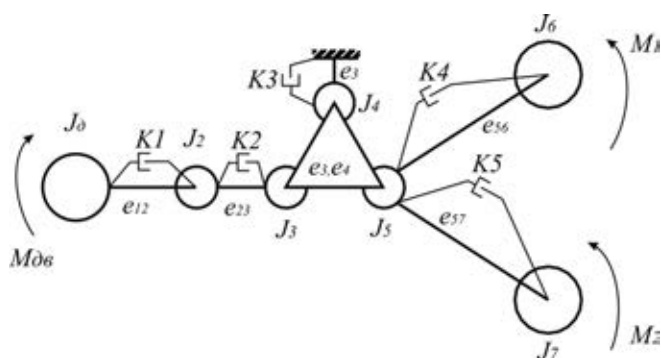


Рисунок 2 — Третий этап переключения

Демпфирование в составленной математической модели задавалось расчетом логарифмического декремента и введением соответствующих коэффициентов демпфирования K_1 — K_5 . Для этого использовались рекомендации и примеры из работ [4, 5, 6].

Решение математической модели (4) осуществлялось численным методом Рунге — Кутты в системе MathCAD с использованием функции Rkadapt. При этом установлено, что для определения времени переключения передач в РК и максимальной нагруженности на одном определенном этапе решение можно проводить и без учета демпфирования. Но при переменных начальных условиях, как в рассматриваемом случае, когда работа механизма разбита на этапы, получить устойчивое решение для непрерывного процесса на всем рассматриваемом диапазоне времени для такой многомассовой системы без учета демпфирования весьма сложно.

На рис. 3 приведены расчетные кривые динамических процессов в изучаемой системе полноприводного автомобиля-тягача типа «Урал» при переключении на повышенную передачу в раздаточной коробке на II передаче в коробке передач. За показатели процесса приняты крутящий момент на участках трансмиссии и частота их вращения. Наибольший интерес представляют динамические процессы в элементах трансмиссии и ходовой части задней тележки как наиболее нагруженных у грузовых автомобилей. Расчетные

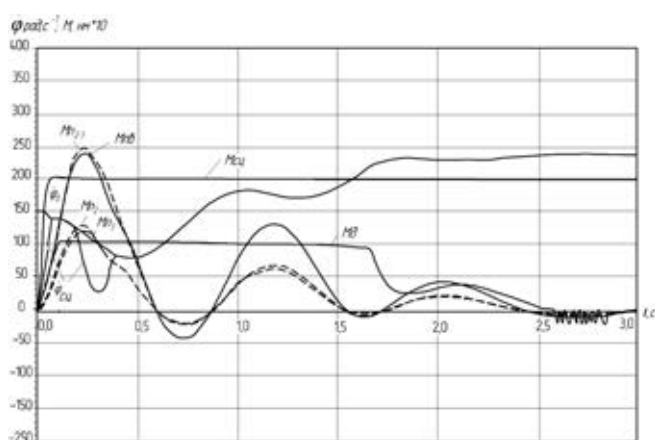


Рисунок 3 — Переходные процессы в трансмиссии при переключении в РК на повышенную передачу: M_0 — крутящий момент на валу двигателя; $M_{сш}$ — момент трения сцепления; $\dot{\phi}_{сш}$ — частота вращения сцепления; $\dot{\phi}_0$ — частота вращения вала двигателя; $M_{н2}$ — крутящий момент на полуоси среднего моста; $M_{н3}$ — крутящий момент на полуоси заднего моста; $M_{н23}$ — суммарный крутящий момент привода задней тележки; $M_{нв}$ — крутящий момент на первичном валу РК

кривые получены по составленной математической модели: привод ведущих мостов блокированный, частота вращения вала двигателя $n_d = 1400 \text{ мин}^{-1}$.

Выводы

1. Общепринятой методикой оценки динамической нагруженности трансмиссии автомобилей является составление системы дифференциальных уравнений с использованием уравнения Лагранжа второго рода. Использование других уравнений, например Аппеля, Чаплыгина, Маджи и т. д., «приводит к неоправданному усложнению в анализе и только препятствует открытию новых динамических результатов» [3].

2. Разработана динамическая схема и на основании уравнения Лагранжа второго рода составлена математическая модель трансмиссии полноприводного автомобиля-тягача типа «Урал» с учетом новой схемы раздаточной коробки.

3. Составленная система дифференциальных уравнений позволяет не только определять время переключения передач в РК и максимальную нагруженность трансмиссии, но и за счет учета демпфирования получать устойчивое решение нахождения поведения участков трансмиссии на всем рассматриваемом диапазоне времени для исследуемой многомассовой системы.

Литература

1. Ксенович И.П., Гоberman В.А., Гоberman Л.А. Наземные тягово-транспортные системы. Т. 1. М.: Машиностроение, 2003. 743 с.
2. Леонов А.И., Дубровский А.Ф. Механические бесступенчатые нефрикционные передачи непрерывного действия. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.
3. Борисов А.В., Мамаев И.С. Неголономные динамические системы. Интегрируемость, хаос, странные аттракторы. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 328 с.
4. Цитович И.С., Альгин В.Б. Динамика автомобиля. Минск: Наука и техника, 1981. 191 с.
5. Альгин В.Б., Павловский В.Я., Поддубко С.Н. Динамика трансмиссии автомобиля и трактора. Минск: Наука и техника, 1986. 214 с.
6. Свитачев А.И. Моделирование и оптимизация динамической нагруженности силовых передач транспортных машин: дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2005. 295 с.
7. Куршин В.Г. Снижение динамических нагрузок в системе «двигатель — трансмиссия — ходовая часть» автомобилей-самосвалов с колесной формулой 6 4: дис. ... канд. техн. наук. М., 1984. 158 с.
8. Прасолов Н.С. Обоснование режимов переключения в автомобильной коробке передач с изменяемым межосевым расстоянием зубчатых зацеплений: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. 120 с.
9. Яковлев П.В. Повышение динамики переключения передач в раздаточной коробке полноприводного автомобиля применением новой кинематической схемы: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2005. 143 с.
10. Яковлев П.В., Драгунов Г.Д. Совершенствование параметров и динамических свойств трансмиссий полноприводных автомобилей-тягачей // Транспорт Урала. 2011. № 2 (29). С. 101—106.

References

1. Ksenovich I.P., Goberman V.A., Goberman L.A. Nazemnye tjavovo-transportnye sistemy. [Ground hauling-transport systems]. Tom 1. M.: Mashinostroenie, 2003. 743 s.
2. Leonov A.I., Dubrovskij A.F. Mekhanicheskie besstupenchatye nefriktsionnye peredachi nepreryvnogo dejstvija. [Mechanical stepless non-friction transmissions of continuous action] M.: Mashinostroenie, 1984. 192 s.
3. Borisov A.V., Mamaev I.S. Negolonomnye dinamicheskie sistemy. Integriruemost, haos, strannye attraktory. [Non-holonomic dynamic systems. Integrability, chaos, stochastic attractors] Moskva – Izhevsk: Institut kompjuternykh issledovanij, 2002. 328 s.
4. Tsitovich I.S., Algin V.B. Dinamika avtomobilja. [Car's dynamics] Minsk : Nauka i tekhnika, 1981. 191 s.
5. Algin V.B. Pavlovskij V.Ja., Poddubko S.N. Dinamika transmissii avtomobilja i traktora. [Dynamics of car's and tractor's transmission] Minsk : Nauka i tekhnika, 1986. 214 s.
6. Svitachev A.I. Modelirovanie i optimizatsija dinamicheskoj nagruzhennosti silovykh peredach transportnykh mashin [Modeling and optimization of dynamic loading of transport machines' pwer train]: dis. ... d– ra tekhn. nauk. Irkutsk, 2005. 295 s.
7. Kirshin V.G. Snizhenie dinamicheskikh nagruzok v sisteme «dvigatel – transmissija – hodovaja chast» avtomobilej-samosvalov s kolesnoj formuloj 6x4 [Reduce of dynamic load in the system 'engine – transmission – running gear' of dump trucks with wheel formula 6x4]: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1984. 158 s.
8. Prasolov N.S. Obosnovanie rezhimov pereklyuchenija v avtomobilnoj korobke peredach s izmenjaemym mezhoosevym rasstojaniem zubchatykh zatseplenij [Justification of switching modes in vehicular transmission with changing axle spacing of gearing]: dis. ... kand. tekhn. nauk . Cheljabinsk : Izd-vo YuUrGU, 2004. 120 s.
9. Yakovlev P.V. Povysenie dinamiki pereklyuchenija peredach v razdatochnoj korobke polnoprivodnogo avtomobilja primeneniem novoj kinematicheskoy skhemy [Increase of gear change dynamics in transfer case of a four-wheel drive vehicle using w new kinematic scheme] : dis. ... kand. tekhn. nauk. Cheljabinsk, 2005. 143 s.
10. Yakovlev P.V., Dragunov G.D. / Sovershenstvovanie parametrov i dinamicheskikh svojstv transmissij polnoprivodnykh avtomobilej-tjavachej [Improvement of parameters and dynamic characteristics of transmissions of four-wheel drive truck tractors] // Transport Urala. 2011. № 2 (29). S. 101–106.

Стоимость одного номера – 180 рублей. Периодичность 4 номера в год.

Министерство связи Российской Федерации										Ф С П - 1	
АБОНЕМЕНТ на _____										46463 (индекс издания)	
Транспорт Урала										Количество комплектов	
На 20 _____ год по месяцам											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда _____				(почтовый индекс)				(адрес)			
Кому _____											
Линия отреза											
ДОСТАВочНАЯ КАРТОЧКА										46463 (индекс издания)	
Транспорт Урала											
На _____											
Стои- мость	подписки перед- рассовки		руб.		коп.		руб.		коп.		Количество комплектов
На 20 _____ год по месяцам											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
почтовый индекс		город село		область							
				район							
код улицы		улица									
дом	корпус	квартира	Фамилия И. О.								

Научно-технический журнал «Транспорт Урала».

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство ПИ №77-18098.

Адрес редакции:

Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66. Тел.: (343) 221-24-44, 221-24-86
e-mail: transporturala@usurt.ru, lneverova@nis.usurt.ru
<http://www.transporturala.usurt.ru>

Учредитель: Уральский государственный университет путей сообщения.

Над выпуском работали:

Переводчики: Ершова Елена Владимировна, Бочкарева Анна Викторовна (Департамент Международных Связей (ДМС) УрГУПС, тел.: (343) 221-24-86).
Корректор Пупова Елена Семеновна.
Верстка и дизайн: Курносов Антон Леонидович.

Выпускающий редактор Неверова Людмила Васильевна.

Контактный телефон: (343) 373-07-41
e-mail: lneverova@nis.usurt.ru, lneverova@eka-net.ru

С 1 января 2007 года 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.

Отпечатано в типографии Фонда развития предпринимательства АМБ:
620026, г. Екатеринбург, ул. Розы Люксембург, д. 59