

ТРАНСПОРТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УРАЛ

**К ВОПРОСУ ОБ УЧАСТИИ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА
В РЕАЛИЗАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПРОЕКТА
«УРАЛ ПРОМЫШЛЕННЫЙ — УРАЛ ПОЛЯРНЫЙ»**

**ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

**ПАРАМЕТРЫ И КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЯКОРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**



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

А.А.Конов, М.Т.Крючков/ Кадровое обеспечение интенсивной модернизации Свердловской железной дороги	3
И.К.Кузьмичев, А.Г.Малышкин/ К вопросу об участии речного транспорта в реализации федерального проекта «Урал промышленный — Урал полярный»	10
А.И.Петров, Е.А.Яковенко/ Логистические основания маркетинг-анализа рынка услуг общественного транспорта	14
О.Н.Вуейкова, О.Н.Ларин, В.И.Куватов/ Моделирование работы автомобильно-экскаваторных комплексов при перевозке горнорудной массы в карьерах	20
П.С.Бурдяк/ Определение положения точек перелома продольного профиля в выходной части сортировочного парка	25
М.А.Рудникова, В.Б.Ручкин/ Особенности оценки эффективности деятельности социально-экономической системы	30

АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА

Д.В.Ефанов, Н.А.Богданов/ Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты	36
В.Е.Митрохин, А.Е.Гаранин, А.В.Ряполов/ Вероятность безотказного функционирования рельсовых цепей при грозовых перенапряжениях	43

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

А.В.Смолянинов, В.Н.Филиппов, И.В.Козлов, А.Н.Давыдов/ Параметры и конструктивное исполнение высокопроизводительного подвижного состава	46
Э.Г.Бабенко, Е.Н.Кузьмичев, Е.А.Дроздов/ Повышение работоспособности цельнокатанных вагонных колес, восстанавливаемых электрошлаковой наплавкой	50
В.Ф.Лапшин, К.О.Долгих/ Совершенствование конструкции кузова полувагона из условия обеспечения сохранности при виброразгрузке	54

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

О.Ю.Портнова/ Построение и исследование математической модели обеспечения вагонами промышленных предприятий	60
О.В.Москвичев/ Информационные технологии как ключевой фактор в обеспечении пропускной способности инфраструктуры	68
Е.Н.Тимухина, Д.Р.Зартдинов/ Автоматизированная экспертиза — инструмент при оценке безопасности транспортных процессов	73

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

М.Г.Дурандин, И.А.Кузьминых/ Расчет нестационарных тепловых процессов в якорной изоляции тяговых электродвигателей	78
А.Т.Когут/ Синтез алгоритмов управления колебаниями при вибродиагностическом контроле механических узлов подвижного состава	84
В.В.Шилер/ Особенности формирования траектории движения стандартной колесной пары	88
А.О.Захаров, Д.Н.Пикалов, М.Ю.Пустоветов, П.В.Страшко/ К вопросу определения режима загруженности по сцеплению локомотивов с асинхронным тяговым приводом	93
В.А.Смирнов/ Функциональная модель предприятия по ремонту подвижного состава при работе в современных условиях	97

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

В.В.Харин, А.К.Остапчук, Е.Ю.Рогов, В.Е.Овсянников/ Повышение активной безопасности прицепа легкового автомобиля	101
---	-----

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Б.А.Аржаников, В.Ф.Григорьев, А.В.Бондаренко, Е.М.Азарова/ Исследование гармонических составляющих токов в трансформаторном агрегате электрифицированных железных дорог переменного тока	105
---	-----

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

A.A.Konov, M.T.Kryuchkov/ Staffing for intensive modernization of Sverdlovsk railway M.T.	3
I.K.Kuzmichev, A.G.Malyshkin/ Regarding the questions of involvement of river transport in implementation of federal project "Ural industrial — Ural polar"	10
A.I.Petrov, E.A.Yakovenko/ Logistics fundamentals of public transport services market analysis	14
O.N.Vueykova, O.N.Larin, V.I.Kuvatov/ Simulation of car-excavating complexes operation transporting ore mass in open pits	20
P.S.Burdyak/ Determining location of fracture points of longitudinal profiles in the exit section of marshalling yard	25
M.A.Rudnikova, V.B.Ruchkin/ Evaluation of the socio-economic system performance effectiveness	30

AUTOMATION AND REMOTE CONTROL

D.V.Efanov, N.A.Bogdanov/ Monitoring of audio frequency track circuit parameters	36
V.E.Mitrokhin, A.E.Garanin, A.V.Ryapolov/ Probability of fault-free operation of track circuits in case of lightning overvoltage	43

CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

A.V.Smolyaninov, V.N.Filippov, I.V.Kozlov, A.N.Davydov/ Parameters and design of high-performance rolling stock	46
E.G.Babenko, E.N.Kuzmichev, E.A.Drozdzov/ Improving operational capability of wrought car wheels reworked by electrosag surfacing	50
V.F.Lapshin, K.O.Dolgikh/ Improving the design of gondola car body with a view to ensure integrity during vibration unloading	54

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

O.Yu.Portnova/ Development and research of mathematical model of car provision to industrial enterprises	60
O.V.Moskvichev/ Information technologies as a key factor in providing infrastructure capacity	68
E.N.Timukhina, D.R.Zartdinov/ Automated examination — a tool for evaluation of transportation process safety	73

ROLLING STOCK AND TRACTION

M.G.Durandin, I.A.Kuzminykh/ Calculation of unsteady thermal processes in anchor insulation of traction motors	78
A.T.Kogut/ Synthesis of vibration control algorithms in vibrodiagnostic control of rolling stock mechanical parts	84
V.V.Shiler/ Specifics of motion pattern development of standard wheel pair	88
A.O.Zakharov, D.N.Pikalov, M.Yu.Pustovetov, P.V.Strashko/ Regarding determination of adhesion load mode of locomotives with asynchronous traction drive	93
V.A.Smirnov/ Functional model of rolling stock repair shop for operation in modern environment	97

MOTOR TRANSPORT

V.V.Kharin, A.K.Ostapchuk, E.Yu.Rogov, V.E.Ovsyannikov/ Active safety improvement of a car trailer	101
---	-----

ELECTRIC SUPPLY

B.A.Arzhannikov, V.F.Grigoriev, A.V.Bondarenko, E.M.Azarova/ Study of harmonic components of currents in transformer unit of electrified AC railways	105
---	-----

УДК 658.3:652.2

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

КАДРОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ СВЕРДЛОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Alexei A. Konov, PhD in History, Associate Professor of «Philosophy and History» Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT),
Mikhail T. Kryuchkov, DSc in History, Professor of «Philosophy and History» Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT)

Staffing For Intensive Modernization Of Sverdlovsk Railway M.T.

Аннотация

В статье дан анализ эффективности системы повышения квалификации инженерных кадров на Свердловской железной дороге в период ее коренной технической реконструкции на базе электрификации. Определены основные формы и особенности обучения инженерно-технических кадров на производстве и на курсах и факультетах повышения квалификации при железнодорожных вузах. Доказана высокая эффективность повышения квалификации инженерных кадров в железнодорожных вузах. Вместе с тем установлено определенное несоответствие между уровнем подготовки инженерных кадров для Свердловской дороги и темпами обновления ее материально-технической базы. Медленные темпы обновления материально-технической базы, постоянный рост перевозочных работы дороги, невысокая оплата инженерного труда приводили к формализму в повышении квалификации инженерно-технических работников и увеличению доли практиков на дороге.

Ключевые слова: электрификация, модернизационные процессы, подготовка кадров, инженерно-технические работники, система повышения квалификации кадров, интеллектуальный потенциал.

Abstract

The paper analyzes the effectiveness of skill improvement system for engineers on the Sverdlovsk Railway during its radical technical reconstruction on the basis of electrification. The basic forms and features of technical personnel training at industrial enterprises and on skill development courses and departments of railway universities are determined. High efficiency of advanced training of technical personnel in railway universities is affirmed. With that, a certain mismatch is revealed between the level of training of engineers for the Sverdlovsk Railway and pace of renovation of its infrastructure and facilities. The slow pace of renovation of infrastructure and facilities of the railway, constant growth of railway traffic, low wages of engineers led to the rise of formalism in the professional development of engineers and increase in the share of practitioners in the railway.

Keywords: electrification, modernization processes, staff training, engineering and technical personnel, advanced training system, intellectual potential.

Сегодня во главе угла кадровых проблем на железной дороге, как и на любом другом предприятии, стоит вопрос о модели развивающейся личности специалиста, востребованного современным инновационным производством, со средним и высшим профессиональным образованием. Специалисты по кадровой политике справедливо отмечают, что устойчивое развитие современного предприятия во многом предопределяется степенью обеспеченности высококвалифицированными и креативными кадрами.

Сегодня основная задача в обучении персонала — необходимость связать подготовку и повышение квалификации специалиста с целями организации [1, с. 95, 101 — 102]. Поэтому особую значимость приобретает научный анализ советской кадровой политики на железнодорожном транспорте в период комплексной модернизации транспортной системы [2, с. 103]. Исследование советской кадровой политики на железнодорожном транспорте позволяет определить оптимальные формы подготовки специалистов в условиях интенсивной модернизации материально-технической базы транспорта, в значительной степени скорректировать в лучшую сторону принципы управления персоналом на современном транспортном предприятии.

Принятый в 1956 г. ЦК КПСС и Советом Министров СССР Генеральный план электрификации железных дорог стал главным направлением в работе железнодорожников по коренной технической реконструкции транспорта. Потребовалось расширить подготовку инженеров и техников по электроподвижному составу, тепловозам и тепловозному хозяйству, энергоснабжению, автоматике, телемеханике и связи и другим специальностям в высших и средних специальных учебных заведениях МПС.

Поскольку технический прогресс на железнодорожном транспорте в 1960 — 1980 гг. прежде всего затрагивал средства тяги, он в первую очередь потребовал подготовки инженерно-технических кадров локомотивного хозяйства и хозяйства электрификации. Широкое внедрение автоблокировки, диспетчерской централизации и механизации сортировочных горок, новых средств связи существенно увеличило удельный вес специалистов по эксплуатации средств СЦБ и связи.

Возрастание потребности в инженерно-технических кадрах было обусловлено также новым строительством железнодорожных путей в регионах, которые осваивались. Бурное развитие нефтедобывающей отрасли в Тюменской области обусловило необходимость создания здесь надежной транспортной артерии. В 1966 г. от Тюмени на север началось строительство железнодорожного полотна. В 1978 г. было образовано Сургутское отделение Свердловской дороги, для развития и функционирования которого требовались кадры. В 1988 г. протяженность Сургутского отделения составляла 1201 км.

В целом в связи с высокими темпами развития научно-технического прогресса на транспорте удельный вес инженерно-технических работников постоянно возрастал, о чем свидетельствуют данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 — Наличие инженеров и техников на железнодорожном транспорте СССР в 1960 — 1970 гг., чел. [3, с. 471]

Специальность	1960 г.	1961 г.	1965 г.	1970 г.
Инженер	53541	53075	60900	78000
Техник	113600	113629	—	196000

Из табл. 1 виден достаточно интенсивный рост количества на транспорте инженеров и техников. Общее количество инженеров в 1970 г. составило по отношению к 1960 г. 145,7%, техников — еще больше: 172,5%. Таким образом, в 1960 гг. на железных дорогах СССР происходили интенсивные модернизационные процессы, связанные с электрификацией линий и строительством новых путей, и именно эти процессы вызвали быстрый рост инженерно-технических кадров.

Научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте в 1960 гг. весьма остро поставил проблемы подготовки новых и переподготовки существующих инженерно-технических кадров. В 1960 г. значительное пополнение специалистами по электрификации, тепловозному хозяйству, автоматике и телемеханике получили железные дороги Восточной Сибири и Южного Урала, на которых в широких масштабах проводились работы по технической реконструкции. На эти дороги из общего выпуска 1960 г. было направлено около 40% инженеров и 50% техников; с других дорог на постоянную работу прибыло более 200 опытных работников в области электрификации и тепловозного хозяйства, а также большая группа работников массовых профессий.

Для обеспечения электрических железных дорог Урала кадрами из местного населения в 1956 г. создан Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта (УЭМИИТ). Основная задача УЭМИИТа — подготовка высококвалифицированных кадров из местной рабочей молодежи.

В результате на Свердловской дороге в 1980 гг. существенно возросла численность специалистов: за 10 лет (1981 — 1990 гг.) количество специалистов увеличилось на 5240 человек. Если в январе 1981 г. на дороге работало 7305 специалистов с высшим образованием, то в январе 1991-го — 9551; специалистов со среднетехническим образованием — соответственно 17728 и 20725 [4, с. 139]. Одновременно началась масштабная работа по переподготовке и повышению

квалификации инженерно-технических кадров на железных дорогах СССР. Реформа системы повышения квалификации сводилась к проведению следующих мероприятий.

1. В соответствии со специально разработанным планом организована сеть курсов при институтах инженеров транспорта, где с отрывом от производства повышали квалификацию руководящие работники по новым видам тяги, автоматике, телемеханике и связи, механизации путевых и строительных работ, технике безопасности.

2. Управлением кадров МПС СССР проводилась большая работа по отбору и направлению в командировки за границу работников железнодорожного транспорта для изучения опыта зарубежных железных дорог.

В 1960 г. делегация советских инженеров транспорта совершила поездку по железным дорогам США, посетив крупные железнодорожные узлы, расположенные в районе Вашингтона, Нью-Йорка, Филадельфии, Питтсбурга, Буффало, Чикаго, Мемфиса, Сент-Питерсбурга, Джексонвилля и Ричмонда. В процессе поездки специалисты-железнодорожники ознакомились с организацией эксплуатационной работы, обслуживанием пассажиров, порядком перевозки грузов, включая использование контейнеров. Делегация ознакомилась с основными типами локомотивов и вагонов и организацией их ремонта. Были осмотрены отдельные участки железнодорожного пути, машины и механизмы, используемые при путевых ремонтных работах, устройства автоматики, сигнализации, централизации, блокировки и связи и счетно-вычислительные центры управлений железных дорог.

Подобные поездки оказывали значительное влияние на развитие железных дорог СССР и проявлялись такими прогрессивными последствиями, как значительное усиление пропускной способности направлений, строительство вторых путей, увеличение объема внедрения средств автоматики и связи для управления движением поездов, пополнение вагонного парка новыми большегрузными вагонами, оборудование существующего парка вагонов роликовыми подшипниками, сокращение сроков перевода железных дорог на новые виды тяги, повышение темпов усиления железнодорожного пути за счет перевода его на щебеночное основание и железобетонные шпалы с укладкой мощных рельсов, ускорение механизации путевых и погрузочно-разгрузочных работ, создание на железнодорожном транспорте сети вычислительных центров.

3. Широко практиковалось сотрудничество инженеров и техников железных дорог с учеными и специалистами вузов и проектных институтов. В 1963 г. на Западно-Сибирской дороге инженеры совместно с учеными Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта выполняли ряд работ и исследований в области совершенствования организации движения поездов, содержания и ремонта пути. По инициативе инженерно-технических работников создано общественное Сибирское отделение электрификации Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, которое успешно работало над рядом проблем электрификации железных дорог.

В 1961 г. сотрудники кафедры «Электрическая тяга» Уральского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта вместе с работниками локомотивного депо Свердловск-Сортировочный разработали и осуществили

на действующем электровозе новую схему смешанного возбуждения тяговых двигателей. В 1963 г. инженеры Октябрьской дороги совместно со специалистами института Гипротранссигнализация плодотворно работали над внедрением на дороге новых образцов автоматики.

Такое содружество инженеров и ученых транспорта служило взаимному обогащению сторон. Инженеры получали возможность познакомиться с последними достижениями транспортной науки, а ученые могли реализовать и проверить свои проекты на практике.

4. В соответствии с постановлением Совета Министров СССР от 1967 г. «О совершенствовании системы повышения квалификации руководящих работников и специалистов промышленности, строительства, транспорта, связи и торговли» на железнодорожном транспорте была организована новая система переподготовки инженерно-технических кадров. С 1968 г. в Москве открыт институт повышения квалификации руководящих работников, а при десяти других институтах — факультеты повышения квалификации специалистов. Этой системой предусматривалось, чтобы каждый руководящий работник и специалист железнодорожного транспорта один раз в 5 — 6 лет смог повысить свою квалификацию по вопросам новой техники, экономики, организации управления, передовой технологии и прогрессивных методов труда.

При этом следует особо отметить, что реформа системы повышения квалификации инженерно-технических работников во многом определялась такими факторами, как интенсивность темпов технического прогресса на транспорте, большие объемы грузовых и пассажирских перевозок, наличие качественно новых, более совершенных форм и методов организации движения поездов, уровень грузонапряженности дороги, особенности и важность участков железных дорог.

Внедрение новой прогрессивной техники и технологий значительно изменило экономические показатели работы транспорта. Чтобы руководящие сотрудники могли адекватно учитывать и оценивать новые условия работы транспорта, они должны были повысить уровень своих экономических знаний.

К 1965 г. на Свердловской дороге были созданы школы-университеты экономических знаний. На Пермском отделении работал двухгодичный университет экономических знаний и научной организации труда, в нем обучались 270 человек. На

Свердловском отделении обучались 180, Тюменском — 150, Чусовском — 63, Нижнетагильском — 90, Серовском — 80, Егоршинском — 85 человек. В управлении дороги работала школа экономических знаний для командного состава.

Как видно из табл. 2, в 1980 гг. на Свердловской железной дороге число слушателей экономических курсов и школ постоянно росло. Свердловская магистраль постепенно входила в условия рыночной экономики, и во всех производственных коллективах возникла необходимость в глубоких экономических знаниях. Потребовался объективный экономический анализ сложившейся в стране социально-экономической ситуации, когда всем становилось ясно, что плановая экономика уже не может функционировать в прежнем виде. В 1990 — 1991 гг. производственно-экономическое обучение на дороге проводилось в условиях, связанных с переходом железнодорожного транспорта к рыночной экономике. Обучение слушателей осуществлялось по трем курсам: основы рыночной экономики; общие проблемы и основные законоположения, связанные с переходом народного хозяйства к регулируемой рыночной экономике; радикальная реформа хозяйственного управления.

Общепризнанным центром железнодорожной науки и повышения квалификации инженеров-железнодорожников Урала стал УЭМИИТ-УрГУПС.

К 1960 г. в УЭМИИТе (УрГУПС) на общественных началах регулярно работали курсы переквалификации инженерно-технических работников локомотивной службы Свердловской дороги. Несколько позднее были организованы аналогичные курсы для ИТР по специальностям «Энергоснабжение электрических железных дорог», «Автоматика, телемеханика и связь». Все эти курсы организовывались для подготовки к переводу главного хода Свердловской железной дороги на электротягу.

Осенью 1963 г. в УЭМИИТе открылись курсы повышения квалификации на базе заочного факультета. Сначала обучение на курсах повышения квалификации было организовано по очно-заочной форме на базе кафедр «Подвижной состав» и «Энергоснабжение». «Переквалификанты», успешно выдержавшие выпускные испытания, получали диплом о втором высшем образовании.

Кроме того, в УЭМИИТе ежегодно проводились курсы по повышению квалификации инженерно-технических работников

Таблица 2 — Экономическое обучение кадров [5]

Форма обучения	1982-1983 гг.		1983-1984 гг.		1984-1985 гг.		1985-1986 гг.		1986-1987 гг.	
	количество	Число слушателей	количество	Число слушателей	количество	Число слушателей	количество	Число слушателей	количество	Число слушателей
Школы коммунистического труда	1269	37751	1511	45282	1789	47652	1835	51021	1633	51590
Школы конкретной экономики	411	12187	403	11127	371	13635	374	13635	250	8574
Народные университеты технического прогресса и экономических знаний	8	1671	8	1982	8	1978	8	1997	8	1812
Школы передового опыта	597	15875	615	16116	620	16320	545	15071	-	-
Просмотр фильмов на технические и экономические темы	3768	82084	3792	93846	39844	85140	39950	86240	-	-

не только Свердловской дороги, но и ряда дорог Советского Союза. Так, на 28-й партийной конференции Железнодорожного района Свердловска, проходившей 12 декабря 1964 г., секретарь парткома УЭМИИТа В.Н. Кабанов отметил в отчетном докладе: «Одной из форм связи института с производством и помощи производству является ежегодное проведение курсов по повышению квалификации инженерно-технических работников железнодорожных предприятий как Свердловской дороги, так и по Союзу». В течение двух месяцев первого полугодия 1964 г. в УЭМИИТе на курсах повышения квалификации обучалась с отрывом от производства группа ИТР; с декабря 1964 г. аналогичная группа занималась уже на трехмесячных дневных курсах. В.Н. Кабанов отмечал в отчетном докладе по этому поводу: «По отзыву самих слушателей (инженерно-технических работников), польза от этих курсов большая» [6].

Важный этап в работе с кадрами начался после выхода постановления Совета Министров (июнь 1967 г.) «О совершенствовании системы повышения квалификации руководящих работников и специалистов промышленности, строительства, транспорта, связи и торговли» [7, с. 207]. В стране была создана сеть отраслевых и межотраслевых институтов повышения квалификации специалистов, открылись соответствующие факультеты и курсы при вузах, министерствах и ведомствах, на предприятиях. Создана сеть учреждений для переподготовки руководящих кадров.

19 декабря 1967 г. вышел приказ МПС СССР № 1401, который предписывал организовать факультеты повышения квалификации в железнодорожных вузах. На Урале этим занялся УЭМИИТ, создав на своей учебно-лабораторной базе факультет повышения квалификации (ФПК) руководящих работников и специалистов железнодорожного транспорта; 13 мая 1968 г. был подписан приказ о его организации.

Особое внимание профессорско-преподавательский состав ФПК уделял занятиям на курсах повышения квалификации для руководителей и специалистов всей сети железных дорог СССР (сетевых курсов). В 1960 — 1970 гг. на ФПК прошли повышение квалификации сотни машинистов-инструкторов локомотивных депо, переходящих на новые виды тяги. Пионерами были железнодорожники Свердловской и Южно-Уральской дорог, но вскоре УЭМИИТ стал ведущим и, по существу, единственным центром на всю сеть железных дорог СССР по повышению квалификации машинистов-инструкторов. География депо, из которых в УЭМИИТ приезжали слушатели, была впечатляющей: от Закавказья, Бреста, Ленинграда, Ростова-на-Дону и Москвы до самого Дальнего Востока, включая все регионы между ними. Вслед за инструкторами в УЭМИИТ поехали и руководители локомотивного хозяйства сети: начальники депо и локомотивных отделов, их заместители. В том числе из таких именитых депо, как Киев и Минск, Москва-Сортировочная, Гребенка, Батайск, Курган, Карталы и т. п.

Факультет повышения квалификации УЭМИИТа успешно укреплял и расширял связи со всеми железными дорогами, но прежде всего со Свердловской. На факультете были организованы курсы по изучению новых систем ПОНАБ, ДИСК, САУТ-Ц. Занятия на экономических семинарах вели не только ученые института, но и руководящие работники Свердловской дороги. Преподаватели электромеханического факультета (ЭМФ)

регулярно проводили консультации с инженерно-техническими работниками депо и заводов, особенно при освоении новых серий электровозов, новых технологических процессов, модернизации узлов и устройств подвижного состава. На факультете повышения квалификации профессорско-преподавательский состав электромеханического факультета ежегодно участвовал в обучении десяти групп мастеров по ремонту электроподвижного состава, инженеров-технологов, машинистов-инструкторов, руководителей локомотивных депо железных дорог Уральского региона [8, с. 25, 327].

К 1970 г. в УЭМИИТе для повышения квалификации инженеров-производственников сформировались научные школы по следующим направлениям: исследование и разработка систем и устройств электроснабжения; проблемы надежности и совершенствования технического обслуживания и ремонта подвижного состава; исследование и разработка тормозных устройств, обеспечивающих автоматизацию режимов управления автоматическими тормозами и контроль их состояния в условиях эксплуатации; создание экологически чистых технологий; разработка имитационных систем для моделирования, расчета и оптимизации железнодорожных станций и узлов.

Выполняя указания МПС № К-26570 от 1976 г., руководством Свердловской дороги совместно с ректором УЭМИИТа был издан приказ № 856/НОК от 13 октября 1976 г., которым были определены группы специалистов и их состав для повышения квалификации без отрыва от производства. Для организации учебного процесса были предусмотрены две формы занятий.

1. По первой форме слушатели один раз в месяц освобождались на полный день от работы для прослушивания лекций, проведения практических занятий и получения консультаций по написанию выпускной работы. Занятия проводились по месту нахождения отделений с выездом туда преподавателей. По окончании периода обучения (6 месяцев) слушатели представляли в экзаменационную комиссию выполненную работу и защищали ее.

2. По второй форме слушателей вызывали в начальный период полугодового обучения в Свердловск на 8 — 10 дней для прослушивания лекций, получения консультаций, выбора темы выпускной работы. Затем за их работой устанавливался контроль со стороны как факультета повышения квалификации, так и работников отдела кадров дороги и соответствующих служб. Для консультации по месту их работы выезжали преподаватели института.

Таким образом, в середине 1950 — в 1970 гг. практически весь контингент инженерно-технических работников транспорта на Урале успешно прошел обучение по повышению квалификации. Это происходило в основном на базе местных научно-образовательных учреждений и курсов с привлечением местного преподавательского состава. Особенностью процесса повышения квалификации работников транспорта края был его краткосрочный характер, связанный с постоянным ростом грузовых и пассажирских перевозок. В итоге проводимую на Урале работу по повышению квалификации инженерно-технических работников транспорта можно оценить как оптимальную и весьма результативную, что стало условием для дальнейшего совершенствования и развития железнодорожного транспорта на Урале.

Таблица 3 — Повышение квалификации инженерно-технических кадров на Свердловской дороге в 1980-е гг., чел. [9]

Показатель	1988 г.	1989 г.	1990 г.
Всего повысили квалификацию работники, занимающие должности руководителей и специалистов	9082	6128	6230
в том числе в институтах повышения квалификации и ФПК с отрывом от производства	701	1015	674
на производственно-экономических семинарах	4840	2167	1869
в университетах технико-экономических знаний	1335	1760	341
в школах социалистического хозяйствования	1659	381	2896
на курсах повышения квалификации	547	1382	113

Как видно из табл. 3, к концу 1980 гг. количество обучаемых инженерно-технических кадров на дороге значительно снизилось. Сокращение числа слушателей происходило главным образом на экономических курсах и так или иначе было связано с экономическим образованием. Экономические знания, которые преподавались инженерам и техникам в учебных заведениях дороги, в условиях перехода страны и транспортной системы к рынку потеряли актуальность. И только в школах социалистического хозяйствования число слушателей существенно выросло. На наш взгляд, рост числа обучаемых в школах социалистического хозяйствования объясняется тем, что железнодорожники обменивались передовым опытом труда и организации производства, методами эффективного использования техники. И эти знания никогда не теряли на транспорте своей значимости. Так, в конце 1987 г. в Егоршино был проведен конкурс мастерства начальников станций. Своеобразие его состояло в том, что начальники станций соревновались в знании всех правил и инструкций движения поездов, коммерческой и финансовой работы. Конкурс помог определить пути получения прибыли, заставил лучше считать доходы и потери.

На Свердловской дороге были организованы и работали на постоянной основе курсы мастеров и командиров среднего звена с отрывом от производства на базе УЭМИИТа. Слушателям читали лекции об основах трудового законодательства и охране труда, о создании психологического климата в коллективе, о вопросах права. Руководящие работники всех рангов повышали свою квалификацию на соответствующих факультетах при вузах МПС, в школах передового опыта. Работа школ передового опыта, кроме экономии средств, была направлена на улучшение организации труда, условий работы, качества ремонта и обслуживания локомотивов и вагонов, на уменьшение брака в работе. Обучение проводилось по таким актуальным проблемам, как обнаружение и устранение неисправностей электровозов ВЛ-10 и ВЛ-11 в пути следования; ремонт тяговых электродвигателей; управление автотормозами в зимних условиях; передовой опыт исполь-

зования комплекса машин тяжелого типа на текущем содержании пути.

Дорожными планами предусматривалось ежегодное повышение квалификации 1000 — 1100 мастеров и командиров среднего звена. Эти кадры повышали свою квалификацию один раз в 5 — 6 лет. На всех ведущих предприятиях, депо, дистанциях пути и сигнализации и связи, энергоучастках были созданы советы мастеров — всего 105 советов. В этот день мастера и командиры среднего звена отчитывались перед советом мастеров и своими коллегами за работу по производственным вопросам, воспитательной работе.

Рассмотрим результаты проделанной работы по повышению квалификации инженерно-технических работников на Свердловской дороге. Начнем с качественного состава работников аппарата Управления Свердловской дороги (табл. 4).

Таблица 4 — Качественный состав аппарата Управления Свердловской железной дороги в 1981 — 1990 гг. [9]

Год	Всего	Число инженерно-технических должностей	Они замещены					
			инженерами	%	техниками	%	практиками	%
1981	713	554	314	56,7	216	39	24	4,3
1982	733	570	317	55,6	218	28	35	6,2
1984	746	585	337	57,6	219	37,4	29	5,0
1985	751	588	339	57,7	223	37,9	26	4,4
1986	681	571	343	60	207	36,2	21	3,6
1987	708	597	373	62,4	208	34,8	16	2,7
1989	746	612	367	60	212	34,6	24	4
1990	746	609	371	61	209	34,3	22	3,6

Табл. 4 показывает, что доля инженеров в аппарате Управления дороги увеличилась с 1981 до 1990 г. с 56,7 до 61%, или на 4,3%. Доля техников за этот же период сократилась с 39 до 34,3%, или на 4,7%. Весьма незначительным оказалось сокращение за эти же десять лет доли практиков в: с 4,3 до 3,6% (на 0,7%). Таким образом, качественный состав работников аппарата Управления дороги заметно улучшился. Однако имело место сохранение определенной доли работников, которые отказывались по тем или иным причинам повышать свой профессиональный и образовательный уровень и стремились руководить прежними командно-административными методами.

Рассмотрим качественный состав мастеров Свердловской железной дороги за этот же период времени (табл. 5).

Табл. 5 демонстрирует определенный рост доли инженерно-технических кадров среди мастеров дороги до середины 1980 гг. Начиная с 1985 г. хорошо прослеживается тенденция к сокращению доли инженеров и техников среди мастеров. В то же время явно выросла доля практиков, особенно в 1988 — 1989 гг. — сразу на 7,7%. В целом доля практиков среди мастеров увеличилась за 1982 — 1989 гг. почти на 4%. Таким образом, можно говорить о некотором ухудшении качественного состава мастеров дороги в 1980 гг., что связано с высокой текучестью наиболее опытных кадров, рабочие места которых были заняты практиками. Обращает на себя внимание незна-

Таблица 5 — Качественный состав мастеров Свердловской железной дороги в 1980-е гг. [9]

Год	Мастера								Учатся в техникумах
	Всего	Инженеры	%	Техники	%	Практики	%	Учатся в вузах	
1982	2121	341	16,1	1031	49,6	729	34,3	39	28
1983	2227	353	15,8	1038	46,0	836	37,0	59	41
1984	2187	387	17,4	1080	49,4	720	33,0	-	-
1985	2231	414	18,6	1080	48,4	737	33,0	-	-
1987	2132	381	17,8	1060	49,7	691	32,4	-	-
1988	2128	361	16,9	1119	52,6	648	30,5	29	39
1989	2133	305	14,3	1013	47,5	814	38,2	32	42

чительная доля мастеров, проходивших обучение в вузах и техникумах в 1980 гг.: в 1982 г. в вузах учились 2% мастеров, в техникумах — 1,3%, в 1983 г. — 2,6 и 2%, в 1988 г. — 1,3 и 2%, в 1989 г. — 1,5 и 2%. Налицо сокращение мастеров, заинтересованных в повышении своего образовательного уровня.

Значительный интерес представляют данные по качественному составу командиров среднего звена (табл. 6).

Таблица 6 — Качественный состав командиров среднего звена Свердловской железной дороги в 1960 — 1989 гг. [10]

Год	Командиры среднего звена								Учатся в техникумах
	Всего	Инженеры	%	Техники	%	Практики	%	Учатся в вузах	
1960	2142	137	6,4	420	19,6	1585	74	-	-
1961	2110	164	7,7	512	24,2	1434	68	-	-
1982	2785	258	10,8	1280	46,0	1203	43,2	30	63
1983	2761	318	11,0	1308	47,0	1135	41,0	45	44
1984	2608	342	12,2	1315	46,8	1151	41,0	-	-
1985	2902	339	11,7	1301	44,8	1262	43,5	-	-
1987	2885	364	12,6	1300	45,0	1221	42,3	-	-
1988	2870	380	13,2	1318	45,9	1172	40,8	29	60
1989	2794	352	12,6	1298	46,5	1144	40,9	31	65

Табл. 6 показывает, что среди командиров среднего звена преобладали техники и практики. Причем доли техников и практиков постепенно сближались. За 1960 — 1989 гг. доля инженеров среди командиров среднего звена увеличилась на 6,2%, доля техников — на 27%. Интенсивные процессы электрификации линий, строительства новых линий и вторых путей, введение автоблокировки и электрической централизации стрелок требовали высококвалифицированного командира среднего звена со специальным техническим образованием и навыками работы с новой техникой. Сохранение значительной доли практиков вело к снижению эффективности применения новой техники. Замедлялись темпы научно-технического прогресса, двойная нагрузка по

обслуживанию новой техники ложилась на квалифицированных работников, взаимодействие квалифицированных работников с практиками вело к нестабильности трудовых коллективов.

Сохранение значительного количества практиков на предприятиях транспорта, определенный формализм в повышении квалификации инженерно-технических кадров связаны со следующими обстоятельствами.

1. Низкие темпы технического обновления некоторых транспортных предприятий, медленное обновление оборудования на отдельных участках дороги объективно не способствовали развитию у ИТР потребности в расширении своего научно-технического кругозора.

2. Руководству Свердловской дороги было достаточно трудно отвлечь инженеров-производственников на учебу на длительный срок в связи с постоянным ростом грузовых и пассажирских перевозок. В свою очередь, оплата труда ИТР за период обучения была явно недостаточной.

3. В условиях нарастания негативных тенденций в экономике, когда выполнение плановых заданий многими предприятиями и отраслями народного хозяйства становилось все более проблематичным, партийные организации не поощряли длительного отвлечения на учебу значительного числа руководителей и специалистов [7, с. 208 — 209].

Государственная политика по повышению квалификации инженерно-технических кадров транспорта проявила свои результаты уже в 1970 г. Существенно улучшился состав руководителей отделений дорог и основных предприятий транспорта. Теперь 97% начальников отделений, их заместителей и главных инженеров отделений дорог имели высшее специальное образование. Среди начальников станций (внеклассных, 1-го и 2-го класса), начальников локомотивных и вагонных депо, энергоучастков, дистанций пути, сигнализации и связи специалисты составляли 97%, в том числе инженеры 73%. Если в 1960 г. среди начальников отделений дорог специалистов насчитывалось всего 33%, то в 1970 г. их доля выросла до 75% [11, с. 449 — 450].

К 1970 г. транспорт в основном был обеспечен опытными, высококвалифицированными и технически грамотными руководителями и инженерно-техническими кадрами. Существенно возросла доля специалистов среди остальных категорий работников: в 1958 г. на 1 тыс. работающих железнодорожников приходилось 48 инженеров и техников, в 1969 г. — более 70, в 1970 г. — 78,5.

Анализ статистических данных позволяет сделать следующие выводы.

1. В 1956 — 1991 гг. на Свердловской железной дороге была создана система непрерывного повышения квалификации всех работников, начиная от молодого рабочего до инженера и техника. Необходимость постоянного повышения квалификации работников была продиктована интенсивными процессами модернизации на транспорте — практически полным переходом на электрическую и дизельную тягу, строительством новых и вторых путей, введением автоблокировки и электрической централизации стрелок.

2. Большая часть работников дороги в исследуемый период повысила свою квалификацию без отрыва от производства на предприятиях дороги, в дортехшколах, на производствен-

но-технических курсах, а также при УЭМИИТе. Повышение квалификации на производстве и при УЭМИИТе учитывало конкретные потребности производства, максимально приближало обучение к решению производственных задач и обходилось дешевле, чем в других учебных заведениях с отрывом от производства.

3. Для инженеров и техников были созданы необходимые условия для постоянного пополнения и обновления знаний, изучения новой техники. Впервые огромное значение для инженера транспорта приобрело экономическое образование.

Вместе с тем негативные процессы в экономике страны на рубеже 1970 — 1980 гг., невысокая оплата труда инженеров и техников, низкие темпы обновления материальной базы ряда предприятий дороги приносили значительную долю формализма в повышение квалификации ИТР, не способствовали формированию стремления у работников улучшать свой профессиональный уровень, приводили к сохранению на предприятиях большого количества практиков — работников без специального образования, как правило, невосприимчивых к научно-техническим инновациям.

Литература

1. Антропов В.А., Морозова Е.Н. Кадровая политика саморазвития предприятий // Вестник УрГУПС, 2010. № 3 (7).
2. Крючков М.Т., Конов А.А., Мацкевич Б.И. Анализ модернизации железнодорожного транспорта на Урале в 1956-1991 гг. // Вестник УрГУПС, 2012. № 3 (15).
3. Железнодорожный транспорт СССР. 1956 — 1970 гг. : сборник документов / МПС РФ. М. : Эгра, 1998. 552 с.
4. Крючков М.Т. Социальная динамика коллективов Свердловской магистрали. 80-е гг. XX века // Россия в прошлом и настоящем : сборник научных статей. Екатеринбург : УрГУПС, 1999. 209 с.
5. Сектор архивов службы управления делами Свердловской железной дороги. Ф. Р-65. Оп. 13. Д. 554. Л. 48 — 55. Д. 569. Л. 63. Д. 583. Л. 103.
6. Центр документации общественных организаций Свердловской области. Ф. 1594. Оп. 1. Д. 518. Л. 75.
7. Личман Б.В. Уральская индустрия в экономической политике Советского государства второй половины 1950-х — середины 1980-х гг. Екатеринбург : УМЦ-УПИ, 2007. 299 с.
8. 50 лет Уральскому государственному университету путей сообщения : исторический очерк. 1956 — 2006 гг. / под общ. ред. проф. А.В. Ефимова. Екатеринбург : У-Фактория, 2006. 432 с.
9. Сектор архивов службы управления делами Свердловской железной дороги. Ф. Р-65. Оп. 13. Д. 554. Л. 36, 40. Д. 569. Л. 72.
10. Государственный архив Свердловской области. Ф. Р-65. Оп. 13. Д. 190. Л. 71. Д. 597. Л. 95.
11. Железнодорожный транспорт СССР 1956 — 1970 гг.: Сборник документов / МПС РФ. 552 с.

References

1. Antropov V. A., Morozova E. N. Kadrovaya politika samorazvitiya predpriyatiy [Self-development HR policy of enterprises] // USURT Herald. 2010. No. 3 (7).
2. Kryuchkov M. T., Konov A. A., Matskevich B. I. Analiz modernizatsii zheleznodorozhnogo transporta na Urale v 1956-1991 [Analysis of modernization of railway transport in the Urals in 1956-1991] // USURT Herald. 2012. No. 3 (15).
3. Zheleznodorozhny transport SSSR 1956 – 1970. [USSR Railway Transport 1956 – 1970]: Collection of documents / MPS RF. M.: Egra, 1998. 552 p.
4. Kryuchkov M. T. Sotsialnaya dinamika kollektivov Sverdlovskoy magistrali 80-e gg. XX veka [Social dynamics of Sverdlovsk Railway teams in the 80s of the XX century] // Rossiya v proshlom i nastoyaschem: [Russia's past and present] Collection of scientific papers. Ekaterinburg: USURT, 1999. 209 p.
5. Archives sector of administration service of the Sverdlovsk Railway. F. R-65. Op. 13. D. 554. L. 48–55. D. 569. L. 63. D. 583. L. 103.
6. Documentation Centre of NGOs of Sverdlovsk Region. F. 1594. Op. 1. D. 518. L. 75.
7. Lichman B. V. Uralskaya industriya v ekonomicheskoy politike Sovetskogo gosudarstva vtoroy poloviny 1950 –serediny 1980. [Urals industry in the economic policy of the Soviet Union of the second half of the 1950s to mid-1980s.] Ekaterinburg: UMTs-UPI, 2007. 299 p.
8. 50 let Uralskomu gosudarstvennomu universitetu putey soobscheniya: istoricheskiy ocherk. 1956–2006. [50th Anniversary of Ural State University of Railway Transport: Historical Sketch. 1956-2006] / General Editor: prof. A.V. Efimov. Ekaterinburg: U-Faktoriya, 2006. 432 p.
9. Archives sector of administration service of the Sverdlovsk Railway. F. R-65. Op. 13. D. 554. L. 36, 40. D. 569. L. 72.
10. State Archive of the Sverdlovsk region. F. R-65. Op. 13. D. 190. L. 71. D. 597. L. 95.
11. Lichman B. V. Uralskaya industriya v ekonomicheskoy politike Sovetskogo gosudarstva vtoroy poloviny 1950 – serediny 1980. [Urals industry in the economic policy of the Soviet Union of the second half of the 1950s to mid-1980s.] 299 p.

УДК 656.624.3 (571.122)

Игорь Константинович Кузьмичев, доктор технических наук, ректор Волжской государственной академии водного транспорта (ВГАВТ), Нижний Новгород,
Александр Георгиевич Малышкин, доктор технических наук, профессор кафедры управления транспортом Волжской государственной академии водного транспорта (ВГАВТ), Нижний Новгород

К ВОПРОСУ ОБ УЧАСТИИ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА В РЕАЛИЗАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПРОЕКТА «УРАЛ ПРОМЫШЛЕННЫЙ — УРАЛ ПОЛЯРНЫЙ»

Igor K. Kuzmichev, DSc in Engineering, Rector of the Volga State Academy of Water Transport (VGAVT),
Alexander G. Malyskin, DSc in Engineering, Professor of «Transportation Management» Chair (VGAVT)

Regarding The Questions Of Involvement Of River Transport In Implementation Of Federal Project “Ural Industrial — Ural Polar”

Аннотация

Рассмотрены возможности речного транспорта по доставке строительных материалов, техники и оборудования на сооружение Северо-Сосьвинской теплоэлектростанции в рамках федерального проекта «Урал Промышленный — Урал Полярный». Приведена номенклатура грузов, объемы перевозок, дана характеристика флота и причалов, проанализирован гидрологический режим рек Северной Сосьвы и Ляпин. Показано, что местные судоходные компании способны доставить грузы всей номенклатуры в полном объеме в течение периода сооружения ТЭС.

Ключевые слова: речной транспорт, судоходные компании, грузовой и буксирный флот, грузовые причалы, гидрологический режим рек, условия плавания, грузовые потоки, федеральный проект «Урал Промышленный — Урал Полярный».

Abstract

In the article they are considered the possibilities of river transport for the delivery of construction materials, machinery and equipment for the construction of Severo-Sosvinskaya CHPP within the framework of the Federal project «Ural Industrial — Ural Polar». Cargo classification and traffic volumes are indicated, characteristic of fleet and berths are provided, hydrological regime of Severnaya Sosva and Lyapin rivers is analyzed; the paper shows that local shipping companies are able to deliver a whole range of goods in full over a period of CHPP construction.

The attention of stakeholders is drawn to the need to use water transport in implementation of the project «Ural Industrial - Ural Polar».

Keywords: river transport, shipping companies, cargo and towing fleet, cargo berths, hydrological regime of rivers, sailing conditions, freight traffic, Federal project «Ural Industrial — Ural Polar».

Федеральный проект «Урал Промышленный — Урал Полярный» предусматривает освоение богатейших месторождений полезных ископаемых Северного Урала. Проект придаст новый импульс развитию промышленных предприятий Среднего и Южного Урала, вынужденных сегодня ввозить из Кузбасса и Казахстана до 90% потребляемых ими энергетических и коксующихся углей и руды. В границах Приполярного Урала только на территории Ханты-Мансийского автономного округа — Югры открыты месторождения бурого и каменного угля, руды черных и цветных металлов, золота и трансурановых элементов, облицовочного камня, кварца, бетонитов, баритов и т. д. Проект предполагает комплексное освоение территории: строительство железной дороги Полуночное — Обская (протяженностью 850 км вдоль восточного склона Северного Урала), автомобильной дороги Агириш — Обская (800 км) и ряда местных дорог; электростанций в Приполярном, Саранпауле и Игриме; предприятий по переработке и обогащению добываемого сырья; возведение новых современных населенных пунктов и развитие существующих (таких как Приполярный и Саранпауль) [1, 2].

Знакомство с проектом «Урал Промышленный — Урал Полярный» показывает, что его авторы не предусматривают участия речного транспорта в доставке грузов на строящиеся объекты, а также в вывозе сырья и готовой продукции потребителям на территории ХМАО-Югры. Реки рассматриваются лишь как препятствия на трассах железных и автомобильных дорог и как источники затрат на сооружение мостов (на железной дороге Полуночное — Обская предполагается построить 11 мостов), насыпей, водостоков под полотном дороги, на укрепление берегов и т. д. Между тем с предгорий Северного Урала в сторону Оби протекают судоходные реки Северная Сосьва и ее приток Ляпин. В районе населенного пункта Саранпауль, расположенного на левом берегу реки Ляпин в 510 км от впадения Северной Сосьвы в Обь, сосредоточены крупные месторождения бурого угля, на базе которых предполагается строительство теплоэлектростанции мощностью 600 МВт. В Саранпауле специально под реализацию проекта построен

современный причал с вертикальной стенкой длиной 158,3 м, с двумя башенными кранами грузоподъемностью 10 т и вылетом стрелы 30 м на фронтальной части причала и один такой же кран в тыловой части. Огороженная береговая территория причала имеет общую площадь 28 тыс. м² с открытой площадкой и обозначенными опорными точками для строительства крытых складов ангарного типа. Территория причала покрыта железобетонными плитами, имеются подъездные автомобильные дороги. Причал принадлежит судоходной компании «Северречфлот».

Ширина р. Ляпин в районе причала даже в меженный период составляет 350 — 400 м, что позволяет организовать рейд для отстоя судов в непосредственной близости от причала. Длина причальной стенки дает возможность одновременно обрабатывать два грузовых судна с суммарной производительностью грузовых работ до 2000 т/сут.

В населенном пункте Хулимсунт (правый берег Сев. Сосьвы, 520 км от устья) имеется причал с вертикальной стенкой длиной 90 м и тремя крытыми складами ангарного типа. На причале нет береговых кранов, грузовые операции выполняются плавучими кранами или собственными перегрузочными средствами грузовых судов. Причал принадлежит дочернему предприятию «Газпрома».

От Хулимсунта до пос. Приполярного имеется благоустроенная автодорога, к Хулимсунту подходит автодорога от железнодорожной станции Агириш. Есть проект строительства автомобильного моста через Сев. Сосьву в Хулимсунте. С обоих берегов реки уже сооружены насыпи для автоподъезда к будущему мосту.

В районе пос. Приполярного имеются месторождения редкоземельных металлов и залежи бурого угля. Там, как и в Саранпауле, планируется строительство теплоэлектростанции.

Саранпауль и Хулимсунт вполне могут рассматриваться в качестве перевалочных пунктов для доставки строительных материалов, тяжелых металло- и железобетонных конструкций, оборудования, строительной, автомобильной и гусеничной техники, жилых домиков для строителей, топлива и других грузов, необходимых для реализации проекта «Урал Промышленный — Урал Полярный».

Гидрологический режим рек Северной Сосьвы и Ляпин по средней многолетней оценке (наблюдения ведутся с 1942 г.) позволяет осуществлять судоходство до Саранпауля и Няксимволя (140 км выше пос. Хулимсунт). Средняя многолетняя продолжительность навигации (реки свободны ото льда) составляет 155 — 160 сут. Период весеннего паводка довольно продолжительный (55 — 60 сут с середины мая до середины июля), что объясняется большими запасами снега в бассейнах рек и их притоков и мощным слоем торфяников в поймах, которые, обладая большой влагоемкостью, поддерживают высокий уровень паводка.

В период паводка глубины на реках позволяют эксплуатировать флот с осадкой 1,4 — 1,5 м, а в течение 45 — 50 сут — даже с осадкой 2 м. На реке Ляпин до Саранпауля имеется береговая и плавучая неосвещаемая судоходная обстановка. На участке Сев. Сосьвы от устья реки Ляпин до Хулимсунта сплошной судоходной обстановки нет, но на наиболее сложных для судоходства участках компании, осуществляющие здесь пере-

возки, выставляют собственные временные знаки, ограждающие отмели, каменные высыпки, печины и другие опасности. Отсутствие освещаемых знаков не является препятствием для судоходства, так как в мае — июле в этих широтах наблюдаются белые ночи, даже в начале августа сумерки сохраняются лишь в течение 2 — 3 ч.

До настоящего времени основные грузопотоки по рекам Сев. Сосьве и Ляпин представлены грузами жизнеобеспечения населения северо-западного региона ХМАО-Югры: это горюче-смазочные материалы, уголь, строительные конструкции, колесная и гусеничная техника, продукты питания и хозяйственные товары. Основная масса грузов поступает с перевалкой с железной дороги (станция Приобье) через речной порт Сергино, имеющий подъездные железнодорожные пути. Общий объем грузов по масштабам возможностей речного транспорта невелик и составляет примерно 100 тыс. т в навигацию. Большая часть грузов доставляется в объеме годовой потребности региона, так как вне навигационного периода единственным способом доставки грузов остается зимник, а он не очень надежный и очень дорогой.

Перевозки осуществляют в основном судоходная компания «Игримречтранс» и пристань Березово. Кроме того, корпоративные перевозки выполняет структурное подразделение «Газпрома» — «Ремонтно-эксплуатационная база флота» (г. Игрим). Грузы по номенклатуре примерно такие же, как и для населения региона, а объемы из года в год существенно колеблются (за счет строительной техники и конструкций). Основными пунктами назначения для грузов «Газпрома» являются Хулимсунт и Няксимволь, в отдельные годы с высоким и продолжительным весенним паводком суда доходят до Усть-Мани.

Характеристика флота, эксплуатируемого на реках Сев. Сосьве и Ляпин, приведена в табл. 1 и 2.

Таблица 1 — Характеристика грузовых судов

Номер проекта	Грузоподъемность, т	Длина корпуса, м	Ширина корпуса, м	Осадка в грузу, м
Самоходные сухогрузные				
276	700	67,3	8,5	2,14
912A	350	62,3	9,2	1,23
912B	350	62,6	9,2	1,4
Несамоходные сухогрузные				
P-56	2800	86,1	17,8	2,6
81108	1100	71,4	14,2	1,8
842	1000	65,6	14,1	1,4
943	600	57,3	12,0	1,4
944	300	46,4	10,0	1,1
81120	200	37,1	9,8	0,8
Самоходные наливные (танкеры)				
1754A	1000	85,3	12,5	1,75
866	600	62,0	9,2	1,85
795	150	49,3	8,5	0,92
Несамоходные наливные				
459H	1850	78,0	15,4	2,13
81219H	900	59,5	13,4	1,57
944H	420	46,5	10,0	1,17
P63	200	44,0	8,0	0,81

Самоходные сухогрузные суда, упомянутые в табл. 1, — трюмные, имеют люковые закрытия телескопического типа, а суда проекта 912В оборудованы собственным краном грузоподъемностью 6 т с вылетом стрелы 8 м. Все несамходные сухогрузные суда — палубные.

Таблица 2 — Характеристика буксирных судов

Номер проекта	Мощность, л. с.	Длина корпуса, м	Ширина корпуса, м	Осадка, м
758	800	40,8	8,6	2,14
P-45	600	32,2	7,8	1,30
1741	600	33,0	8,3	1,50
P-162	450	26,8	9,2	0,8
911	300	28,6	6,9	1,1
P-96	150	21,8	5,3	0,7

Буксирные теплоходы проекта 758 мощностью 800 л. с. из-за большой осадки (2,14 м) используются в основном на перевозках до пос. Игрим или в период высоких паводков до пос. Сосьва (устье реки Ляпин). Другие теплоходы водят составы из барж грузоподъемностью 200 — 1100 т до Саранпауля и Хулимсунта.

Следует отметить, что Ханты-Мансийский автономный округ не только проявил интерес к федеральному проекту, но и в порядке подготовки к его реализации выполнил ряд масштабных мероприятий: построен капитальный причал в пос. Саранпауль, изданы лоцманские карты рек Ляпин (до Саранпауля) и Сев. Сосьвы (до Хулимсунта), выставлена береговая и плавучая обстановка на реке Ляпин, в порту Сергино подготовлены места для перевалки тарно-штучных (в том числе тяжеловесных) грузов с железной дороги на воду, наконец, заключен договор с учеными-речниками на выполнение специальной научной работы.

По заданию Департамента транспорта ХМАО-Югры Волжская государственная академия водного транспорта (ВГАВТ, Нижний Новгород) провела обследование рек Сев. Сосьвы и Ляпин с целью определения возможности и масштабов участия водного транспорта в реализации федерального проекта «Урал Промышленный — Урал Полярный». Один из авторов настоящей статьи был научным руководителем этого исследования и вместе с группой специалистов прошел на специальном судне по рекам Сев. Сосьве и Ляпин, посетил пункты Хулимсунт, Саранпауль, Сосьва, Игрим, Березово, а также порт Сергино на Оби (железнодорожная станция Приобье).

Одной из задач исследования было определение объемов грузов, необходимых для строительства Северо-Сосьвинской теплоэлектростанции в районе Саранпауля, и возможности их доставки речным транспортом. На теплоэлектростанции предполагается установка 4 энергоблоков единичной мощностью по 150 МВт, в качестве топлива будет использоваться бурый уголь местного месторождения (20 — 30 км от Саранпауля). Для оценки общего количества грузов, необходимых для сооружения электростанции, исследователи привлекли в порядке субподряда Нижегородский филиал «Теплоэлектропроекта».

Строительство электростанции потребует предварительного создания соответствующей инфраструктуры (дорог, городка строителей, объектов соцкультбыта, бытовых коммуника-

ций и т. д.). Наши обоснования строились на использовании вахтового метода строительства, при этом единовременное количество строителей оценивается в 350 человек с учетом административного аппарата. Для их размещения потребуются не менее 125 единиц бытовок, штабных и жилых вагончиков, кухонь-столовых и других объектов. Для сооружения самой электростанции необходимы строительные материалы (песок, щебень, гравий, цемент), металлические и железобетонные конструкции, технологическое оборудование, электрооборудование, строительная техника и многое другое.

Углубленная оценка потребности в материалах и оборудовании для строительства Северо-Сосьвинской теплоэлектростанции, которые могут быть доставлены речным транспортом в Саранпауль, приведена ниже.

- Строительные материалы (щебень, гравий, цемент) — 350 тыс. т;
- строительные конструкции, трубы, арматура — 60 тыс. т;
- технологическое оборудование — 17 тыс. т;
- электрооборудование — 7 тыс. т;
- временные сооружения — 170 тыс. т;
- строительная техника (экскаваторы, бульдозеры, краны, автотехника) — 4 тыс. т.

Всего речники должны доставить в Саранпауль более 600 тыс. т различных грузов, в том числе более 200 единиц колесной и гусеничной техники. Предполагается, что строительный песок будут добывать на местных карьерах, его доставка речным транспортом не планируется.

Названные выше объемы перевозок должны быть освоены в течение всего срока строительства электростанции (3 года), т. е. по 200 тыс. т в навигацию. Проектируя организацию перевозок, мы исходим из того, что в течение 45 сут до Саранпауля могут доходить суда с осадкой до 2 м, а в течение 60 сут — с осадкой 1,4 м. Рассматривались как транзитный вариант движения судов от порта Сергино до Саранпауля, так и варианты с частичной перевалкой грузов в суда с меньшей осадкой в пунктах Игрим или Сосьва (рис. 1). В любом варианте доставка 200 тыс. т в навигацию вполне возможна, но в Саранпауле должна быть организована временная разгрузочная площадка с плавкранами, поскольку пропускной способности капитального причала окажется недостаточно для обработки всего грузопотока в период непродолжительной навигации. Грузового и буксирного флота в судоходных компаниях, функционирующих в Обь-Иртышском бассейне, вполне хватит, чтобы обеспечить потребность в перевозках на Саранпауль.

Что касается доставки грузов на строительство теплоэлектростанции в Игриме, то для речников здесь не будет никаких проблем, так как продолжительность навигационного периода с гарантированной глубиной 1,7 м на участке Сев. Сосьвы от устья до Игрима составляет 150 сут, а с глубиной более 2 м — 90 сут. В Игриме нет причалов с береговыми кранами, грузовые операции будут выполняться плавучими кранами.

Доставка грузов для строительства электростанции в Приполярном с участием водного транспорта при наличии автодороги Агириш — Светлый — Хулимсунт — Приполярный потребует дополнительных экономических обоснований.

Судоходная компания «Игримречтранс» и «Ремонтно-эксплуатационная база флота» «Газпрома» уже много лет успешно выполняют перевозки по рекам Сев. Сосьве и Ляпин. На

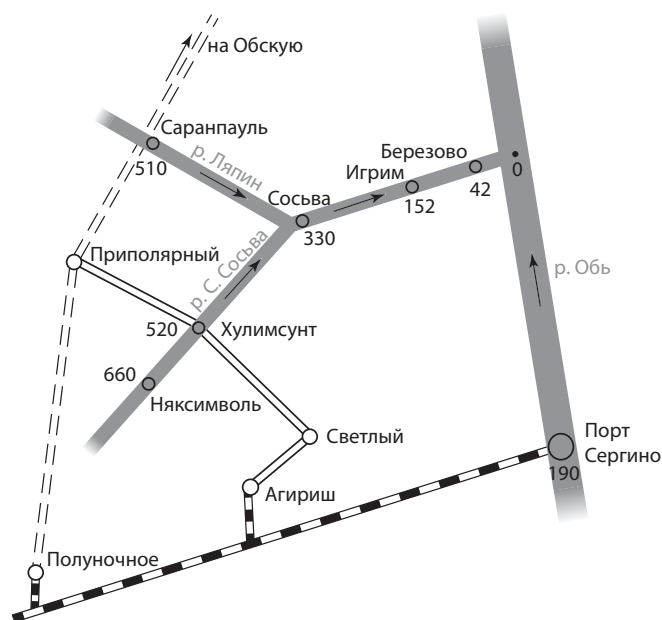


Рисунок 1 — Схема транспортных связей северо-западной части Югры (расстояния по рекам указаны от устья Северной Сосьвы)

флоте работают опытные экипажи, хорошо знающие лоцию рек и условия плавания в разные периоды навигации. Флот работает практически без аварий, случаются лишь происшествия в виде посадок на мель. Но при существенном увеличении судопотока пропорционально возрастает экологическая нагрузка на водную среду. Эксплуатируемые на этих реках суда не оборудованы современными средствами сбора, хранения или утилизации бытовых отходов. На данных реках нет береговых пунктов приема с судов жидких и сухих отходов, а плавучие средства сбора отходов встречаются лишь в крупных портах на Оби и Иртыше. При организации перевозок грузов в больших объемах вопросы сохранения экологической чистоты водной среды могут оказаться решающими. Судоходные компании, планирующие свое участие в реализации проекта освоения Полярного Урала, должны быть готовы к разрешению экологических проблем.

По мере освоения территории Полярного Урала будет расти численность населения региона, в частности, Саранпауль превратится в город с населением в 30 тыс. человек (сейчас это поселок с населением чуть более 3 тыс. человек). Остро встанет вопрос организации надежного пассажирского сообщения. Сейчас из районного центра Березово в Саранпауль можно долететь на самолете Ан-2, доехать на автобусе по зимнику или в летний период водным транспортом с пересадкой в пос. Сосьва. При этом пассажирские суда ходят лишь до 1 августа, пока на реках сохраняются достаточные глубины.

В последние годы на реках России эксплуатируются суда на воздушной подушке (СВП). Для их движения необходима водная или ровная ледовая поверхность, они могут преодолевать песчаные косы и выходить на ровный пологий берег с углом наклона до 7°. В некоторых крупных городах европейской части России СВП работают круглогодично на переправах и в качестве городских водных такси, круглый год действует переправа на Амуре между Благовещенском и китайским городом Хайхэ. СВП широко используются МЧС и МВД, эксплуатируются частными фирмами для собственных нужд.

Опыта эксплуатации пассажирских СВП на протяженных маршрутах нет. В рамках федерального проекта можно было бы провести экспериментальные рейсы СВП до Саранпауля и в летний, и в зимний период. Современные СВП, которые строят на судостроительных предприятиях Нижнего Новгорода и Омска, имеют пассажироместимость от 10 до 48 человек. Они оборудованы необходимыми средствами безопасности и жизнеобеспечения пассажиров, включая обогрев салона в зимнее время. Специальных причалов для посадки-высадки пассажиров не требуется, так как СВП выходит на пологий берег, поэтому пассажиры по откидному трапу покидают судно или поднимаются на борт. Скорость СВП на водной поверхности — 50 — 60, на ровной ледовой — 60 — 70 км/ч.

Публикуя настоящую статью, авторы преследуют цель обратить внимание государственных структур, корпорации «Урал Промышленный — Урал Полярный» и ее партнеров на необходимость использования речного транспорта в реализации проекта.

Литература

1. Литовский В.В. Проблемы пространственного формирования опорного транспортного каркаса Урала: мега-проект «Урал Промышленный — Урал Полярный» // Транспорт Урала. 2011. № 2 (29). С. 3 — 9.
2. Минеев В.И., Малышкин А.Г., Уртминцев Ю.Н. Научные проблемы реализации «Транспортной стратегии России до 2030 г.» и задачи ученых отрасли // Речной транспорт. 2012. № 1. С. 30 — 34.

References

1. Litovskiy V.V. Problemy prostranstvennogo formirovaniya opornogo transportnogo karkasa Urala: megaproekt "Ural Promyshlenny - Ural Polyarny" [Problems of spatial generation of backbone transportation framework of the Urals: mega-project "Ural Industrial - Ural Polar"] // Transport of the Urals. 2011. No. 2(29). P.3 -9.
2. Mineev V.I., Malyshkin A.G., Urtmintsev Yu.N. Nauchnye problemy realizatsii "Transportnoy strategii Rossii do 2030 g." i zadachi uchenykh otrasli [Scientific problems of implementation of "Transport Strategy of Russia to 2030" and problems of scientists in the industry] // Rechnoy transport. 2012. No. 1. P. 30 -34.

УДК 656.13.072

Артур Игоревич Петров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Тюменского нефтегазового государственного университета (ТюмГНГУ),
Елена Александровна Яковенко, аспирант кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Тюменского нефтегазового государственного университета (ТюмГНГУ)

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ МАРКЕТИНГ-АНАЛИЗА РЫНКА УСЛУГ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Artur I. Petrov, PhD in Engineering, Associate Professor of «Motor transport Operation» Chair of TyumGNGU
Elena A. Yakovenko, graduate student of «Motor Transport Operation» Chair of TyumGNGU

Logistics Fundamentals Of Public Transport Services Market Analysis

Аннотация

Рассмотрены вопросы повышения эффективности городского общественного транспорта на основе разработки и практического использования логистической классификации маршрутов. Основой такой классификации может быть ABC-XYZ-анализ. Приведена методология маркетинг-анализа рынка услуг и результаты его использования при анализе эффективности системы общественного транспорта Тюмени.

Ключевые слова: общественный транспорт, неравномерность спроса и предложения услуг, логистика, ABC-XYZ-анализ, рекомендации по совершенствованию организации перевозок.

Abstract

The article examines the issue of improving efficiency of public transport through the development and practical use of routes logistic classification. The basis of this classification can be ABC-XYZ analysis. The article describes the methodology of marketing analysis of services market and the results of its use in the analysis of efficiency of the public transport system in Tyumen.

Keywords: public transport, irregularity of demand and supply of services, logistics, ABC-XYZ analysis, recommendations for improvement of transportation organization.

Повышение доступности индивидуального транспорта для большей части населения страны и учащение ритма городской жизни в последние годы привели к росту транспортной подвижности населения. Как следствие, для большинства городов нашей страны стали обыденностью транспортные заторы, неблагоприятная экология, высокий уровень дорожно-транспортных происшествий, большие затраты на организацию перевозок. Сложная транспортная ситуация в городах оказывает существенное негативное влияние на качество жизни населения и общее экономическое развитие города. В последние годы сформировался феномен «жизнь в городе», обладающий самыми противоречивыми, от явно положительных до однозначно отрицательных, признаками. Минимизация отрицательного влияния на человека особенностей проживания в городах — явный вызов современного этапа развития человеческой цивилизации, отвечать на который приходится вне зависимости от желания и возможности.

В большинстве стран Западной Европы таким ответом является перенос акцентов в развитии транспорта с индивидуального автомобильного на общественный или другие формы передвижения (велосипед, пешеходные передвижения в Дании, Германии, странах Бенилюкса).

В РФ власть [1] признает существование проблемы значительного отрицательного влияния индивидуального автомобиля на жизнь человека, однако мало что делает для кардинального изменения ситуации. В течение 2000 — 2010 гг. в большинстве регионов РФ для решения транспортных проблем был выбран экстенсивный путь наращивания финансирования дорожного строительства, что требовало поиска резервов ресурсов всех видов. В качестве такого резерва во многих регионах страны был выбран вариант перераспределения бюджета автодорожной отрасли, т. е. увеличение доли бюджетной статьи на строительство и реконструкцию дорог за счет снижения доли финансирования общественного транспорта [2].

В то же время абсолютно очевидно стремление властных органов повышать качество жизни горожан, в том числе и транспортную составляющую. Выражается это в попытках создать конкуренцию, вывести на рынок транспортных услуг

как можно больше частных перевозчиков, обеспечить контроль за их деятельностью и т. д. Получается это не всегда. Основная причина — особенности формирования спроса населения на услуги пассажирского общественного транспорта (ПОТ), что приводит к отсутствию на большей части маршрутов рентабельности. Это, в свою очередь, ведет к попыткам власти выставлять на тендерный конкурс пакеты маршрутов, где на каждый прибыльный маршрут приходится до десятка убыточных, обязывать предпринимателей работать без очевидного экономического интереса. Данная практика возникает в условиях сочетания двух обстоятельств: желания властных органов максимально удовлетворить потребности горожан в транспортных передвижениях по всем возможным направлениям и слабого представления о фактических механизмах формирования спроса населения на эти передвижения.

Существование особенностей формирования спроса на транспортные услуги ПОТ необходимо учитывать посредством маркетингового фактора внешней среды [3, 4]. Таким образом, возникает насущная необходимость проведения маркетинг-анализа рынка услуг общественного транспорта, выявления закономерностей формирования спроса на транспортные передвижения горожан и предложения таких услуг перевозчиками. Хорошим, удобным инструментом анализа рынка услуг на основе учета его маркетинговых особенностей является логистический анализ [5].

Как отмечает Т.Е. Евтодиева в [6], «непрерывный характер развития экономики определяет необходимость изменения способов и форм организации бизнеса и использования новых концепций его реализации». Одним из лучших подходов решения задачи маркетинг-анализа рынка услуг пассажирских перевозчиков является использование логистических приемов, в частности ABC-XYZ-анализа.

Классический ABC-XYZ-анализ предполагает изучение и распределение по группам логистических объемов (ABC-анализ), например продаж каких-либо услуг и неравномерности их формирования во времени (XYZ-анализ). В данном случае не предполагается оценка распределения этих услуг в пространстве, только лишь во времени. Однако в случае услуг ПОТ возникает необходимость в изучении потребления услуг не только во времени, но и в пространстве, а следовательно, в трансформации логистического ABC-XYZ-анализа с учетом особенностей рынка услуг пассажирского транспорта в несколько иную концепцию [6]. В данном случае предлагается классифицировать маршруты по группам А, В и С с учетом величины и постоянства пассажиропотока по времени, а также по группам X, Y и Z — в пространстве.

Исходя из соображений о значимой связи ($R^2 = 0,9$) между величиной пассажиропотока и доходностью перевозок на маршруте [7] при решении вопросов о доходности перевозок на различных маршрутах можно воспользоваться результатами анализа особенностей формирования маршрутного пассажиропотока.

Классическая дифференциация особенностей пассажиропотока предполагает изучение и учет его неравномерности относительно среднего значения. Основными классификационными признаками маршрутов с учетом изменения спроса и предложения на перевозки во времени и пространстве являются:

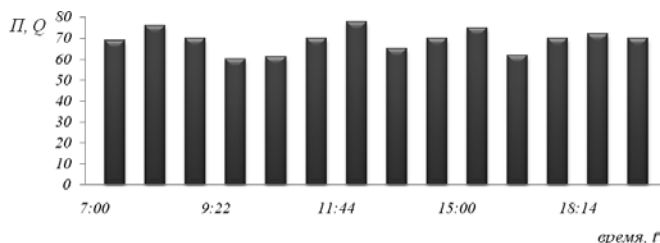
- 1) неравномерность спроса/предложения услуг во времени;
- 2) неравномерность спроса/предложения услуг в пространстве.

Знание особенностей формирования неравномерности спроса/предложения во времени и пространстве позволит организаторам оптимизировать режимы работы подвижного состава городского общественного транспорта на конкретных маршрутах с учетом реальных потребностей населения.

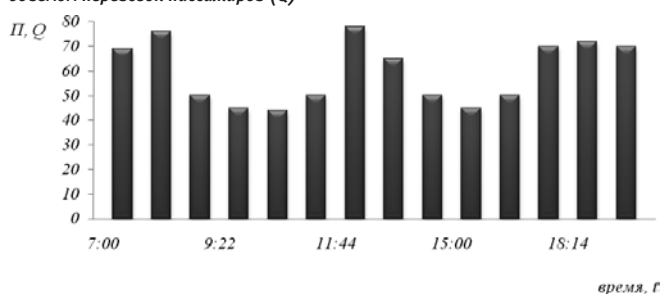
Характеристиками оценки уровня спроса/предложения являются такие эксплуатационные показатели, как пассажиропоток (Π) и объем перевозок пассажиров (Q). Существуют три основных класса маршрутов с учетом неравномерности спроса/предложения во времени (рис. 1):

- 1) маршруты с относительно постоянным во времени пассажиропотоком (Π) или объемом перевозок пассажиров (Q);
- 2) маршруты с ярко выраженным по времени изменением пассажиропотока (Π) или объема перевозок пассажиров (Q);
- 3) промежуточный вариант.

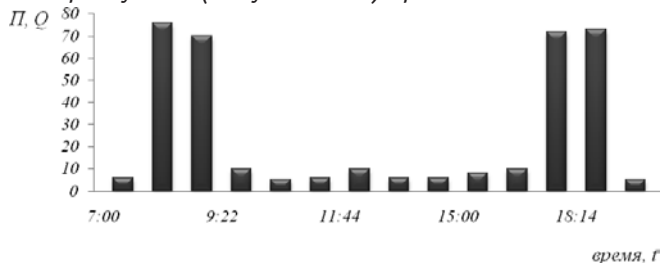
Назовем их тип А, тип С и тип В соответственно.



Тип А: с относительно постоянным по времени пассажиропотоком (Π) или объемом перевозок пассажиров (Q)



Тип В: промежуточный (между типами А и С) вариант

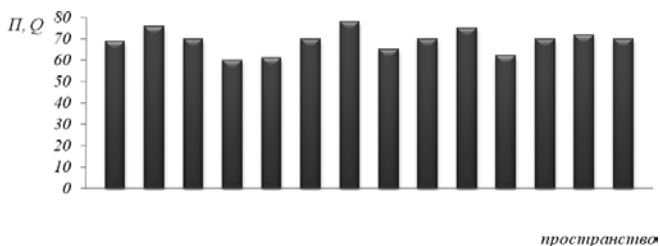


Тип С: с ярко выраженным по времени изменением пассажиропотока (Π) или объема перевозок пассажиров (Q)

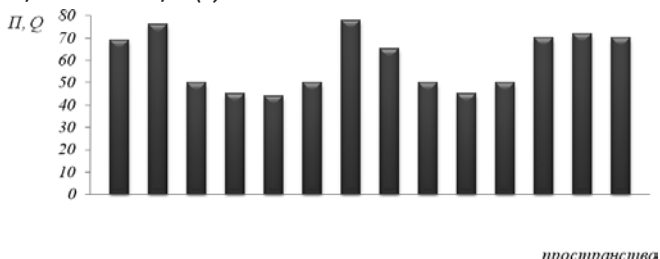
Рисунок 1 — ABC-классификация маршрутов общественного транспорта с учетом неравномерности пассажиропотока по времени

С учетом неравномерности спроса/предложения в пространстве подобным образом также можно выделить три класса маршрутов (рис. 2):

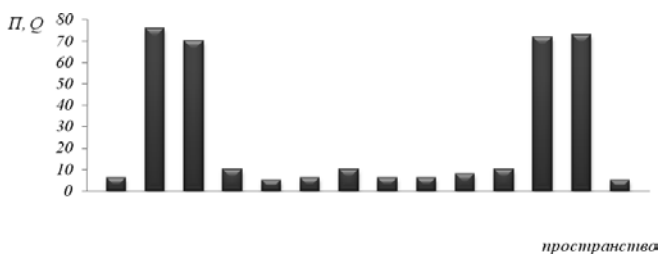
- 1) тип X — с постоянным в пространстве пассажиропотоком (Π) или объемом перевозок пассажиров (Q);
- 2) тип Z — с ярко выраженным в пространстве изменением пассажиропотока (Π) или объема перевозок пассажиров (Q);
- 3) тип Y — промежуточный вариант.



Тип X : с постоянным в пространстве пассажиропотоком (Π) или объемом перевозок пассажиров (Q)



Тип Y : промежуточный (между типами X и Z) вариант



Тип Z : с ярко выраженным в пространстве изменением пассажиропотока (Π) или объема перевозок пассажиров (Q)

Рисунок 2 — XYZ-классификация маршрутов общественного транспорта с учетом неравномерности пассажиропотока в пространстве

Если взять за основу стандартную схему деления имеющихся ресурсов с помощью ABC-XYZ-анализа, можно получить матрицу, где все регулярные маршруты городского общественного транспорта разбиты на девять блоков, каждый из которых имеет две характеристики с позиций неравномерности в пространстве и во времени (табл. 1).

Предлагаемая классификация маршрутов ПОТ с учетом маркетингового фактора внешней среды предполагает пять логистических классов маршрутов:

- 1-й класс — группа маршрутов AX_{ij} (для нее характерен относительно постоянный во времени и пространстве пассажиропоток);

Таблица 1 — Логистическая классификация маршрутов ПОТ с учетом признака неравномерности спроса и предложении во времени и пространстве

Категория		Пространство j		
		X	Y	Z
Время i	A	AX_{ij}	AY_{ij}	AZ_{ij}
	B	BX_{ij}	BY_{ij}	BZ_{ij}
	C	CX_{ij}	CY_{ij}	CZ_{ij}

- 2-й класс — группы маршрутов BX_{ij}, AY_{ij} ;
- 3-й класс — группы маршрутов $CX_{ij}, BY_{ij}, AZ_{ij}$;
- 4-й класс — группы маршрутов CY_{ij}, BZ_{ij} ;
- 5-й класс — группа маршрутов CZ_{ij} (маршруты с крайне нестабильным пассажиропотоком во времени и пространстве).

2, 3, 4-й классы маршрутов ПОТ, по сути, являются промежуточными по отношению к крайним 1 и 5-му классам.

Стоит отметить, что и спрос на пассажирские перевозки, и предложение транспортных услуг — величины стохастические. Величина C_{ij} с учетом изменения во времени колеблется очень значительно, в то время как Πp_{ij} чаще всего изменяется в пределах $\pm 5 — 10\%$. В пространстве C_{ij} и Πp_{ij} могут изменяться по-разному, в зависимости от особенностей конфигурации маршрута и его расположения на территории города.

Для корректного сравнения между собой различных маршрутов и распределения их по классам необходимо использовать коэффициент неравномерности пассажиропотоков в пространстве и времени $K_{нер.}$ [8, с.142]

$$K_{нер.} = \frac{Q_{max}}{Q_{cp}}, 1 \leq K_{нер.} \leq K_{нер. max}, \quad (1)$$

где Q_{max} — максимальная мощность пассажиропотока, пасс./ед. времени;

Q_{cp} — средняя мощность пассажиропотока, пасс./ед. времени

Комплексный коэффициент неравномерности определяется путем перемножения двух частных коэффициентов $K_{нер. время}$ и $K_{нер. пространство}$

$$K_{нер.} = K_{нер. время} \cdot K_{нер. пространство} \quad (2)$$

Фактические значения $K_{нер.}$ пассажиропотоков на городских маршрутах ПОТ Тюмени, по данным авторов, могут достигать от 1,3 (при $K_{нер. время} = 1,15$ и $K_{нер. пространство} = 1,15$) до 7 — 8 (при $K_{нер. время} = 3,5 — 4$ и $K_{нер. пространство} = 2$). Практически это граничные значения всего диапазона значений $K_{нер.}$ пассажиропотоков. С учетом логистической классификации маршрутов ПОТ (см. табл. 1) и эмпирического диапазона значений $K_{нер.}$ пассажиропотоков можно предложить следующую классификацию маршрутов ПОТ (табл. 2).

Исследования пассажиропотоков, проведенные в 2010 — 2011 гг. на социально убыточных маршрутах Тюмени [7] показали, что их можно отнести по данной классификации к 1 — 3 классам. Для большинства этих маршрутов характерны не только низкая величина пассажиропотоков, но и высокая неравномерность распределения пассажиропотоков во времени ($K_{нер. время} > 2,0$) и пространстве ($K_{нер. пространство} > 1,25$). Наоборот, для маршрутов относительно успешных с позиций рента-

Таблица 2 — Фактические значения $K_{пер}$ пассажиропотоков на городских маршрутах ПОТ, классифицируемых на 5 логистических классов

Показатель	Значения $K_{пер}$ пассажиропотоков для логистических классов маршрутов				
	1 класс	2 класс	3 класс	4 класс	5 класс
Значения $K_{пер}$ пассажиропотоков	[1; 1,75]	[1,75; 2,5]	[2,5; 3,25]	[3,25; 4]	[4; +∞[

бельности характерны высокая равномерность пассажиропотоков и во времени, и в пространстве ($K_{пер. время} = 1,15 — 1,3$ и $K_{пер. пространство} = 1,15 — 1,3$).

Естественно, важно не только классифицировать реально существующие маршруты города по маркетинговым группам с учетом результатов логистического анализа, но и найти закономерности общего порядка, описывающие распределение маршрутов по этим группам.

Для решения этой задачи можно использовать подходы, представленные в уже разработанных ранее методиках, например в методике количественного определения показателя сложности маршрута [9]. Несмотря на то что данная методика создавалась для решения задач корректирования нормативов технической эксплуатации автобусов, ее идеология соответствует постановке задачи в нашей интерпретации.

В качестве исходных данных [9] для расчета показателя сложности маршрута $\Pi_{сл}$ используются значения плановой средней эксплуатационной скорости $V_{ср}$, средней длины перегона $l_{пр}$, удельного числа поворотов на маршруте движения $n_{пр}$, коэффициента использования пассажироместимости γ и средней плотности транспортного потока ρ

$$\Pi_{сл} = -0,314 - 0,059 V_{ср} - 0,506 l_{пр} + 0,713 n_{пр} + 0,764 \gamma + 0,246 \rho \quad (3)$$

В работе [9] А.А. Назаров также выделяет пять категорий сложности маршрутов (табл. 3). Стоит отметить, что численные значения обобщенного параметра сложности рассчитывались на базе автобусных парков ГУП «Мосгортранс» и при расчете для другого города могут варьироваться в другом диапазоне. Анализ для системы ПОТ Тюмени показал, что фактически здесь $\Pi_{сл}$ регулярных автобусных маршрутов варьируется в диапазоне от $-1,5$ до $1,5$, хотя для маршрутов, большая протяженность которых приходится на пригородную зону, данный показатель может достигать $-2,8$. В связи с этим предлагается несколько скорректировать классификацию маршрутов ПОТ (см. табл. 3). Также корректировки требует смысловая нагрузка классификации.

В частности, коррекция классификации маршрутов ПОТ предполагает не только изменение формы классификации, но и ее содержания. В концепции А.А. Назарова [9] под понятием простой маршрут с позиций сложности последующих процессов технической эксплуатации автобуса понимается периферический маршрут. Этот маршрут обеспечивает высокую скорость движения автобуса и зачастую невысокое наполнение салона. В нашем же случае такой маршрут для организаторов перевозок (эксплуатационная служба ПАТП), наоборот, является сложным, так как именно для таких маршрутов характерна высокая неравномерность пассажиропотоков и во

Таблица 3 — Категории сложности городских автобусных маршрутов и соответствующие им численные значения обобщенного параметра сложности маршрута движения городского автобуса $\Pi_{сл}$ [9 и данные авторов]

Категории сложности городских автобусных маршрутов (по [9])	Интервал численных значений $\Pi_{сл}$ ед. (по [9])	Предлагаемые логистические классы автобусных маршрутов (по данным авторов)	Соответствие категорий сложности городского автобусного маршрута логистическим классам	Предлагаемые интервалы значений показателей сложности $\Pi_{сл}$ ед. (по данным авторов)
1 (максимально простой)	от $-1,8$ и менее	5	CZ _{ij}] $-\infty$; $-1,5$]
2	от $-1,8$ до $-0,6$	4	CY _{ij} , BZ _{ij}] $-1,5$; $-0,5$]
3	от $-0,6$ до $0,6$	3	CX _{ij} , BY _{ij} , AZ _{ij}] $-0,5$; $0,5$]
4	от $0,6$ до $1,8$	2	BX _{ij} , AY _{ij}] $0,5$; $1,5$]
5 (максимально сложный)	от $1,8$	1	AX _{ij}] $1,5$; $+\infty$ [

времени, и в пространстве, а следовательно, грамотная организация работы автобусов на таких маршрутах требует больших профессиональных усилий.

Исследования неравномерности пассажиропотоков во времени и пространстве на маршрутах ПОТ Тюмени позволили сформировать следующую таблицу исходных данных для регрессионного анализа связи $\Pi_{сл}$ маршрута ПОТ и $K_{пер}$ пассажиропотоков (табл. 4).

Таблица 4 — Связь сложности маршрутов ПОТ Тюмени, неравномерности пассажиропотоков и удельных объемов перевозок за рейс (данные 2010 — 2012 гг.)

№ маршрутов ПОТ Тюмени	Экспериментально-расчетные характеристики, характерные для некоторых маршрутов ПОТ Тюмени					
	$\Pi_{сл}$ ед.	$K_{пер. время}$	$K_{пер. простр.}$	$K_{пер}$	Класс маршрута	Объем перевозок за рейс $Q_{пр}$ пасс./рейс
1	0,54	1,45	1,25	1,81	2	63,4
3	-0,41	1,6	1,5	2,4	3	*
7п	0,36	1,5	1,3	1,95	3	*
9	-1,05	2,2	1,4	3,08	4	*
10	-0,55	2,4	1,9	4,56	4	*
13	0,83	1,4	1,2	1,68	2	53,6
14	1,33	1,25	1,2	1,50	2	67,6
15	1,43	1,23	1,22	1,50	2	56,5
17	0,86	1,2	1,42	1,70	2	77,3
19	-0,35	1,8	1,3	2,34	3	32,1
23	-1,24	1,9	1,6	3,04	4	24,1
25	1,12	1,23	1,2	1,47	2	70,9
27	-0,12	1,6	1,4	2,24	3	23,9
28	0,17	1,3	1,5	1,95	3	*
30	1,55	1,15	1,12	1,28	1	69,2
38	0,49	1,4	1,3	1,82	3	25,1
43	1,11	1,3	1,2	1,56	2	*
46	1,21	1,18	1,15	1,36	2	46,9
54	1,17	1,15	1,18	1,35	2	62,3

* На маршруте не используются автобусы большой вместимости (данные маршруты не рассматривались при построении зависимости $Q_{пр} = f(K_{пер})$.

Графическое изображение зависимости $\Pi_{cl} = f(K_{нер})$ представлено на рис. 3.

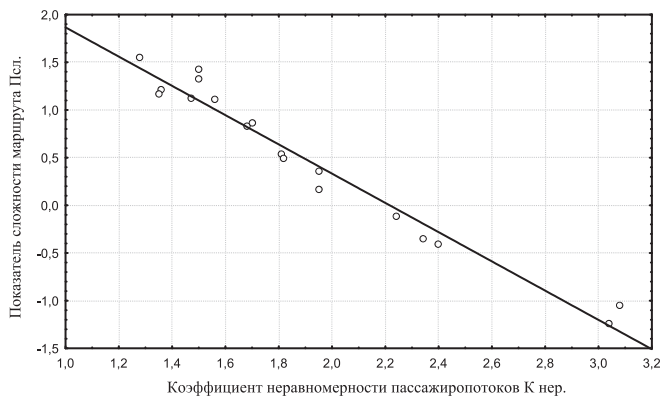


Рисунок 3 — Зависимость $\Pi_{cl} = f(K_{нер})$, определенная для 19 исследованных маршрутов ПОТ Тюмени

Эта зависимость достаточно адекватно описывается линейной моделью

$$\Pi_{cl} = 3,40 - 1,53K_{нер} \quad (4)$$

В табл. 5 представлены основные статистические характеристики линейной модели, описывающей зависимость (4).

Таблица 5 — Статистические характеристики математической модели $\Pi_{cl} = f(K_{нер})$

Математическая модель	Статистические характеристики				
	Коэффициент парной корреляции R	Коэффициент парной детерминации D	Дисперсионное отношение Фишера F	Вероятность адекватности выбранного уравнения регрессии экспериментальным данным $P(F)$	Средняя ошибка аппроксимации e
$\Pi_{cl} = 3,40 - 1,53K_{нер}$	0,98	0,96	430,7	0,98	1,64

Данная модель (4) позволяет сделать вывод о наличии регрессионной связи между неравномерностью пассажиропотоков и сложностью маршрута, т. е. облегчить задачу классификации маршрутов ПОТ с учетом результатов логистического анализа.

Возвращаясь к исходной постановке вопроса — насколько может быть полезен маркетинг-анализ, основанный на логистической классификации, в решении управленческих вопросов, попробуем определить наличие корреляционной связи между удельными объемами перевозок за рейс Q_p и комплексным коэффициентом неравномерности пассажиропотоков на маршрутах $K_{нер}$. Данные о зафиксированных специалистами департамента транспорта и дорожной инфраструктуры администрации Тюмени величинах Q_p на исследованных маршрутах приведены в табл. 4.

На рис. 4 представлено графическое изображение зависимости $Q_p = f(K_{нер})$.

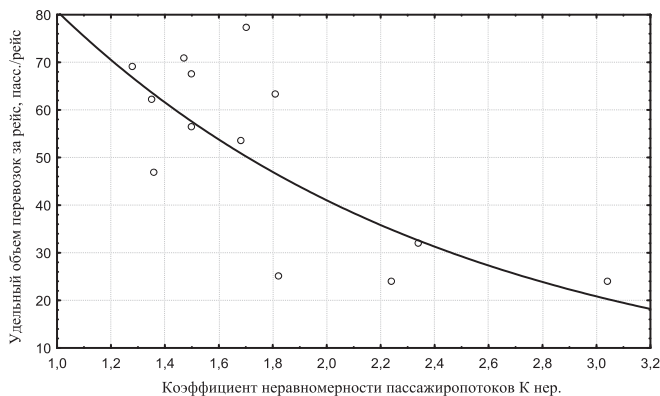


Рисунок 4 — Зависимость $Q_p = f(K_{нер})$, определенная для 13 исследованных маршрутов ПОТ Тюмени

Можно предположить, что эта зависимость описывается экспоненциальной моделью (5)

$$Q_p = 158,9 \exp(-0,67K_{нер}). \quad (5)$$

В табл. 6 представлены основные статистические характеристики линейной модели, описывающей зависимость (5).

Таблица 6 — Статистические характеристики математической модели $Q_p = f(K_{нер})$

Математическая модель	Статистические характеристики				
	Коэффициент парной корреляции R	Коэффициент парной детерминации D	Дисперсионное отношение Фишера F	Вероятность адекватности выбранного уравнения регрессии экспериментальным данным $P(F)$	Средняя ошибка аппроксимации e
$Q_p = 158,9 \exp(-0,67K_{нер})$	0,76	0,58	15,07	0,8	13,1

Относительно невысокий уровень корреляционной связи между $K_{нер}$ и Q_p определяется в первую очередь влиянием на формирование величины Q_p большого числа других факторов, таких, например, как длина маршрута $L_{м}$, средняя длина поездки пассажира $l_{ср}$ и коэффициент сменности $\eta_{см}$.

Между тем можно сделать предварительный вывод о возможности использования логистического маркетинг-анализа в решении ряда управленческих задач. На рис. 4 визуально видно различие в величине Q_p маршрутов, а значит, и доходах перевозчиков, работающих на этих маршрутах. Соответственно, если с маршрутами 1-го логистического класса с позиций экономико-стратегического управления проблем нет, то уже к маршрутам 2 и 3-го логистических классов необходимо присмотреться с позиций необходимости поиска вариантов повышения эффективности перевоз-

ок за счет снижения величины неравномерности пассажиропотоков (для маршрутов 2-го класса — за счет снижения неравномерности пассажиропотока в пространстве или по длине маршрута; для маршрутов 3-го класса — за счет снижения неравномерности пассажиропотока и в пространстве, и во времени). Маршруты 4 и 5-го логистических классов — маршруты, на которых нельзя использовать автобусы большой вместимости ни при каких обстоятельствах и вообще необходимо использовать такие формы организации

обслуживания населения, как разрывные смены (работа только в часы пик) и работа на укороченных версиях этих маршрутов.

В заключение отметим, что предложенная классификация маршрутов ПОТ с учетом логистических подходов является составной частью разрабатываемой авторами методики рационализации работы системы транспортного обслуживания населения с учетом влияния на ее функционирование маркетингового фактора внешней среды.

Литература

1. Блудян Н.О. Актуальные проблемы транспортного обслуживания населения и экономики // Автотранспортное предприятие. 2007. № 5. С. 14 — 18.
2. Петров А.И., Колесов В.И. Оптимизация государственно-муниципальной стратегии в вопросах бюджетного финансирования общественного транспорта // Автотранспортное предприятие. 2011. № 1. С. 15 — 19.
3. Петров А.И. Концептуальные основы совершенствования управления городским пассажирским общественным транспортом на основе учета влияния внешней среды // Транспорт. Наука, техника, управление. 2011. № 4. С. 42 — 47.
4. Петров А.И. Влияние внешней среды на устойчивость системы пассажирского общественного транспорта. Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. 300 с.
5. Логистика: общественный пассажирский транспорт. М. : Экзамен, 2003. 224 с.
6. Евтодиева Т.Е. Развитие форм организации логистики: теория и методология : автореф. дис. ... докт. экон. наук. Самара, 2012. 40 с.
7. Петров А.И. К вопросу о качестве и эффективности транспортного обслуживания населения на периферийных маршрутах пассажирским общественным транспортом в г. Тюмени // Нефть и газ Западной Сибири : матер. междунар. науч.-техн. конф, 2011. Т. 2. С. 210 — 214.
8. Пассажирские автомобильные перевозки / В.А. Гудков, Л.Б. Миротин, А.В. Вельможин, С.А. Ширяев. М. : Горячая линия — Телеком, 2004. 448 с.
9. Назаров А.А. Разработка комплекса мероприятий по совершенствованию функционирования городских автобусов на основе учета сложности маршрута движения : дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 190 с.

References

1. Bludyan N.O. Aktualnye problemy transportnogo obsluzhivaniya naseleniya i ekonomiki [Actual problems of public transport services for population and economy] // Avtotransportnoe predpriyatie. 2007. No. 5. p. 14 — 18.
2. Petrov A.I., Kolesov V.I. Optimizatsiya gosudarstvenno-munitsipal'noy strategii v voprosakh byudzhethnogo finansirovaniya obschestvennogo transporta [Optimization of state-municipal strategy in budget financing of public transport] // Avtotransportnoe predpriyatie. 2011. No. 1. p. 15 — 19.
3. Petrov A.I. Kontseptualnye osnovy sovershenstvovaniya upravleniya gorodskim passazhirskim obschestvennym transportom na osnove ucheta vliyaniya vneshney sredy [Conceptual framework of improvement of urban public passenger transport management based on consideration of the environment influence] // Transport. Nauka, tekhnika, upravlenie. 2011. No. 4. p. 42 — 47.
4. Petrov A.I. Vliyaniye vneshney sredy na ustoychivost sistemy passazhirskogo obschestvennogo transporta. [Influence of environment on the stability of public passenger transport system] Tyumen: TyumGNGU, 2011. 300 p.
5. Logistika: obschestvenny passazhirskiy transport [Logistics: public passenger transport] . M.: Ekzamen, 2003. 224 p.
6. Evtodieva T.E. Razvitie form organizatsii logistiki: teoriya i metodologiya [Development of logistics organization forms: theory and methodology]: abstract from Economics DSc Thesis. Samara, 2012. 40 p.
7. Petrov A.I. K voprosu o kachestve i effektivnosti transportnogo obsluzhivaniya naseleniya na periferiynnykh marshrutakh passazhirskim obschestvennym transportom v g. Tyumeni [Concerning quality and efficiency of public transport services in peripheral routes for public passenger transport of Tyumen city] // Oil & Gas in Western Siberia: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Vol. 2. P. 210 — 214.
8. Passazhirskie avtomobilnye perevozki [Passenger road transportation] / V.A.Gudkov, L.B.Miroitin, A.V.Velmozhin, S.A.Shiryayev . M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2004. 448 p.
9. Nazarov A.A. Razrabotka kompleksa meropriyatiy po sovershenstvovaniyu funktsionirovaniya gorodskikh avtobusov na osnove ucheta slozhnosti marshruta dvizheniya [Development of a set of measures to improve operation of urban buses based on consideration of difficulty of traffic route] : Engineering PhD Thesis. Moskva, 2006. 190 p.

УДК 656.13

Ольга Николаевна Вуейкова, соискатель кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск,
Олег Николаевич Ларин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация автомобильного транспорта» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск,
Валерий Ильич Куватов, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем организации транспортных систем Института проблем транспорта РАН, заслуженный работник высшей школы (Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЬНО-ЭКСКАВАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ГОРНОРУДНОЙ МАССЫ В КАРЬЕРАХ

Olga N. Vuykova, degree applicant student of «Motor Vehicle Operation» Chair, South Ural State University. Chelyabinsk.
Oleg N. Larin, head of the «Motor Vehicle Operation» Chair, DSc in Engineering, Professor. South Ural State University. Chelyabinsk

Valery I. Kuvatov, DSc in Engineering, Professor, Head of the Laboratory for organization of transport systems, Honored employee of higher education system. Institute of Transport Problems of RAS. St. Petersburg

Simulation Of Car-Excavating Complexes Operation Transporting Ore Mass In Open Pits

Аннотация

Рассмотрены вопросы совершенствования работы автомобильно-экскаваторного комплекса с учетом технологических параметров карьеров и структуры парка автосамосвалов. Предложена математическая модель рационального распределения автосамосвалов по экскаваторам для разнотипной структуры парка автосамосвалов, обеспечивающего минимизацию совокупных непроизводительных простоев в ожидании погрузочных работ при наиболее эффективном использовании рабочего ресурса экскаваторов. Планирование работы автомобильно-экскаваторных комплексов относится к классу задач линейного программирования — с поиском экстремума линейных функций при линейных дополнительных ограничениях, налагаемых на переменные. Задача рассмотрена в традиционной постановке, т. е. с учетом существующей технологической последовательности работ, норм и правил.

Ключевые слова: карьерный автомобильный транспорт, производительность, транспортный процесс, эффективность, грузовые перевозки.

Abstract

The paper considers the issues of improving operation of car-excavator complex in view of technological parameters of pits and dump truck fleet structure. A mathematical model of rational distribution of dump trucks to excavators is proposed for polytypic structure of dump truck fleet, minimizing total downtime while waiting for loading, with the most efficient use of excavator operating resource. The task of planning car-excavation complex operation belongs to the class of linear programming problems - finding extremum of linear functions under additional linear constraints imposed on variables. The problem is considered in the traditional formulation, i.e. with account to the current operating sequence, rules and regulations.

Keywords: open pit transport, performance, transport process, efficiency, freight transportation.

Горнодобывающая промышленность — основа индустриального потенциала многих стран, в значительной степени определяющая экономические показатели других отраслей. В современных условиях одна из главных задач горнодобывающих предприятий — повышение эффективности транспортного процесса при минимальных потерях всех видов ресурсов. Транспортировка горнорудной массы в карьерах — важнейшее звено единого технологического процесса добычи полезных ископаемых. Основным видом технологического транспорта при добыче полезных ископаемых открытым способом является автомобильный транспорт [1 — 3].

Однако применяемые в настоящее время методы моделирования и планирования работы карьерных автосамосвалов созданы на основе описания этого процесса как локального объекта и не в полной мере учитывают особенности формирования структуры парка автотранспортных средств на современных карьерах. Это приводит к потерям рабочего времени автосамосвалов и экскаваторов и имеет ряд недостатков [4]. Комплексный подход к данной проблеме расширяет возможности поиска альтернативных решений и путей по повышению эффективности транспортировки горнорудной массы в карьерах [5, 6]. Поэтому задача совершенствования работы автосамосвалов с учетом и в комплексе с работой экскаваторов как единого автомобильно-экскаваторного комплекса весьма актуальна и имеет важное научное и хозяйственное значение.

Совершенствование работы карьерных автосамосвалов путем их рационального распределения по экскаваторам с учетом влияния различных технико-эксплуатационных факторов и структуры парка позволит увеличить производительность карьерного автотранспорта, уменьшить простои автомобильно-экскаваторного комплекса, повысить объемы

перевозимой горнорудной массы и, как следствие, снизить себестоимость ее транспортировки.

Результаты анализа статистических данных и проведенных исследований показывают, что потери времени одного автосамосвала $t_{ож}^a$ в ожидании погрузки экскаватором за одну езду могут варьироваться в широком диапазоне и составлять 10 мин на одну погрузку, а за год в среднем достигают 498 ч. В результате простоев снижаются общие объемы вывезенной горнорудной массы, что, как следствие, приводит к значительным экономическим потерям горнодобывающего предприятия в целом. В табл. 1 приведены данные о годовых экономических потерях, связанных с простоем одного самосвала в ожидании погрузочных работ.

Таблица 1 — Экономические потери от простоя одного самосвала в ожидании погрузки

Параметр	Значение параметра
Недовыполненные объемы перевозок за год, тыс. т	184,76
Годовые потери от простоя в ожидании погрузки, тыс. руб.	383,5
Экономические потери от неотгруженной руды, тыс. руб.	37 335,4

Приведенные в табл. 1 потери обусловлены в основном различиями режимов движения автосамосвалов различных типов в конкретных условиях эксплуатации. Они не учитываются при планировании работы автомобильно-экскаваторных комплексов, при закреплении и определении необходимого количества автосамосвалов различных типов за конкретным экскаватором для обеспечения бесперебойной его работы. Это приводит к отклонениям интервалов движения, нарушению ритма работы экскаватора, к простоям автосамосвалов и экскаваторов в ожидании начала погрузочных операций.

Современные тенденции развития горной техники и технологии заключаются в увеличении грузоподъемности карьерных автосамосвалов и их производительности. Структура парка подвижного состава горнодобывающего предприятия представлена несколькими типами автосамосвалов с различными техническими параметрами при грузоподъемности в диапазоне от 91 до 180 т. Для загрузки автосамосвалов также используются экскаваторы различных типов с объемом ковша от 6,3 до 27 м³.

Организация движения автотранспорта в карьерах осуществляется по замкнутому циклу, когда группа, как правило, различных типов автосамосвалов закрепляется за определенным экскаватором. С учетом технической готовности парка производится ежедневная корректировка закрепления автосамосвалов за экскаваторами. При перераспределении автосамосвалов между экскаваторами не учитываются различия технико-эксплуатационных показателей работы различных типов автосамосвалов. Упрощенное представление о физических закономерностях протекания погрузочного и транспортного процессов в сложных транспортно-технологических системах приводит к существенным отклонениям фактических показателей работы от плановых значений и непроизводительным потерям в системе.

Планирование работы автомобильно-экскаваторных комплексов по усредненным параметрам, без учета существенных различий в технико-эксплуатационных показателях работы автосамосвалов и экскаваторов, взаимодействующих как единый

автомобильно-экскаваторный комплекс, отличается простотой расчета плановых параметров, однако не обеспечивает высокой точности планирования параметров работы автомобильно-экскаваторного комплекса и не учитывает возможного влияния структуры парка на образование непроизводительных простоев. Использование дополнительных параметров, характеризующих горно-технологические условия работы карьерного транспорта и структуру его парка, обеспечивает повышение качества планирования работы автомобильно-экскаваторного комплекса и сводит к минимуму непроизводительные простои в системе [7].

Существенное влияние на производительность автосамосвалов различных типов и их технико-эксплуатационные показатели оказывают расстояние транспортировки горнорудной массы, скорость движения груженого самосвала и время, затрачиваемое на выполнение погрузочно-разгрузочных операций автосамосвала (подъезд под погрузку, разгрузку, ожидание погрузки) [8, 9].

При обслуживании экскаватора однотипными автосамосвалами характерны относительно незначительные простои времени ожидания погрузки, которые обусловлены влиянием факторов случайной природы на отклонение фактических значений параметров работы автосамосвалов от плановых значений. Влияние однотипной структуры парка автосамосвалов на время ожидания $t_{ож}^a$ не выявлено. При разнотипной структуре потери на ожидание погрузки $t_{ож}^a$ во-первых, достигают значительных значений, во-вторых, такие потери обусловлены отклонениями фактических от плановых значений параметров работы разнотипных автосамосвалов, у которых существенно отличаются технико-эксплуатационные показатели, в-третьих, данные потери имеют четко выраженную нелинейную зависимость от структуры парка закрепленных за экскаватором автосамосвалов.

В теории организации грузовых перевозок одной из основных причин возникновения простоев автосамосвалов в ожидании погрузки является несоответствие ритма работы экскаватора R интервалам движения автомобилей I , вследствие чего возникают простои либо подвижного состава в ожидании погрузки, либо экскаваторов. Организация ритмичной работы автомобильно-экскаваторного комплекса предполагает обеспечение равномерной загруженности экскаватора, отсутствие задержек в процессе маневрирования автомобилей при въезде на погрузочные площадки и съезде с них, стабильную продолжительность погрузки.

Плановый интервал движения автосамосвалов по маршрутам I определяется по формуле

$$I = \frac{t_{об} + t_n + t_{сп} + t_p + t_{нор}}{A_m}, \quad (1)$$

где $t_{об}$ — время оборота автосамосвала по маршруту, мин;

A_m — количество автосамосвалов на маршруте, ед.;

t_n — время погрузки автосамосвала экскаватором, мин;

$t_{сп}$ — время движения с грузом автосамосвала по маршруту, мин;

t_p — время разгрузки автосамосвала, мин;

$t_{нор}$ — время движения порожнего (без груза) автосамосвала по маршруту, мин.

При этом показатели $t_{об}$, t_n , $t_{сп}$, t_p , $t_{нор}$ для каждого маршрута движения находятся в функциональной зависимости от со-

вокупности перечисленных выше факторов, влияющих на технико-эксплуатационные показатели различных типов автосамосвалов, а если их планировать по среднему значению, то неизбежны отклонения в работе системы.

Для обеспечения бесперебойной работы экскаватора интервалы движения автосамосвалов по маршруту I должны соответствовать ритму работы экскаватора R

$$R = I. \quad (2)$$

При этом следует отметить, что ритм работы R , который фактически задается величиной времени погрузки автосамосвала t_{pi} для различных i -х типов автосамосвалов A_{mi} имеющих разную грузоподъемность q_i , будет различаться.

Чтобы выполнить условие (2) при планировании работы самосвалов, следует на маршрут выпустить следующее количество машин A_m

$$A_m = \frac{t_{об}}{I} = \frac{t_{об}}{R}. \quad (3)$$

Если происходят отклонения фактического интервала движения самосвалов $I_{ф}$ от планового значения $I_{пл}$ то возникают простои как самосвала, так и экскаватора:

- 1) при $I_{ф} < I_{пл}$ экскаватор находится в ожидании самосвала, т. е. $t_{ож}^a > 0$;
- 2) при $I_{ф} > I_{пл}$ самосвал находится в ожидании под погрузкой, т. е. $t_{ож}^a > 0$.

Оптимизация работы автомобильно-экскаваторного комплекса должна быть направлена на снижение совокупных непроизводительных простоев системы, связанных с ожиданием погрузки $t_{ож}^{ЭК}$, для всего задействованного на карьере количества A_{mi} автосамосвалов i -го типа ($i = 1, 2 \dots n$) и количества A_{ej} экскаваторов j -го типа ($j = 1, 2 \dots m$) т. е.

$$T_{ож}^{ЭК} = \sum_{i=1}^n t_{ож}^a + \sum_{j=1}^m t_{ож}^b \longrightarrow \min, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^n t_{ож}^a$ — суммарное время ожидания погрузки автосамосвалами, мин; $\sum_{j=1}^m t_{ож}^b$ — суммарное время простоя экскаваторов

в ожидании погрузки, мин.

При этом приоритетным является снижение потерь времени простоя экскаваторов в ожидании погрузки, так как только при непрерывной их работе может быть получена максимальная прибыль горнодобывающим предприятием в результате наибольшего вывоза, переработки и реализации горнорудной массы.

При однотипной структуре парка самосвалов время их загрузки t_n одинаково для всех машин и соответствует ритму работы экскаватора и интервалу их движения

$$t_n = R = I. \quad (5)$$

При разнотипной структуре парка самосвалы A_{mi} имеют разную грузоподъемность q_i и соответственно различное время загрузки t_{ni} . В этом случае ритм работы j -го экскаватора, чтобы обеспечить непрерывность его работы, должен назначаться по наименьшему значению времени погрузки t_{nij}^{\min} из возможных значений для всех эксплуатируемых с данным экскаватором типов автосамосвалов

$$R_{\min j} = t_{nij}^{\min} = \min \{t_{nij}\}. \quad (6)$$

Однако чтобы обеспечить ритм работы j -го экскаватора по уравнению (6), необходимо также запланировать наименьший интервал движения

$$R_{njl} = I_{njl} = R_{\min j} = I_{\min j} = t_{nij}^{\min}, \quad (7)$$

и, как следствие, согласно (3), на маршрут к j -му экскаватору должно быть выпущено наибольшее количество машин

$$A_{mj}(R_{\min j}) = \frac{t_{об}}{I_{\min j}} = \frac{t_{об}}{R_{\min j}}. \quad (8)$$

При разнотипной структуре парка автосамосвалов A_{mi} для каждого i -го типа машин время оборота $t_{оbi}$ также будет отличаться. Поэтому, чтобы определить плановое количество машин, которое обеспечит выполнение условия (6) с учетом (8), при расчете $A_{mj}(R_{\min j})$ следует использовать наибольшее из возможных значений времени оборота $t_{оbi}^{\max}$ автосамосвалов на j -м маршруте, определяемых для всех эксплуатируемых с данным экскаватором типов автосамосвалов

$$t_{оbi}^{\max} = \arg \max \{t_{оbi}\}. \quad (9)$$

Тогда выражение (8) запишем следующим образом:

$$A_{mj}(R_{\min j}) = \frac{t_{оbi}^{\max}}{R_{\min j}} = \frac{t_{оbi}^{\max}}{t_{nij}^{\min}}. \quad (10)$$

Соотношение структуры парка характеризуется показателем η_m , который отражает долю большегрузных самосвалов A_{mi}^{\max} в общем количестве машин,

$$\eta_m = \frac{A_{mi}^{\max}}{\sum_{i=1}^n A_{mi}} \quad (11)$$

При работе на маршруте различных типов самосвалов в количестве $A_{mi}(R_{\min j})$, имеющих разное время оборота, неизбежны отклонения в их работе, образование простоев автосамосвалов и, возможно, простоев экскаваторов в ожидании погрузки.

Так как время погрузки большегрузного самосвала t_{ni}^{\max} будет больше используемого для расчета ритма работы экскаватора времени погрузки, т. е. $t_{ni}^{\max} > t_{ni}^{\min}$, то следующий за ним автосамосвал, прибывающий через интервал I_{njl} будет ожидать в очереди время $t_{ож}^a$ которое рассчитывается как

$$t_{ож}^a = |t_{ni}^{\max} - I_{njl}| = |t_{ni}^{\max} - t_{ni}^{\min}| \quad (12)$$

Суммарное время простоя самосвалов за смену составит

$$T_{ож}^a = \sum_{i=1}^n A_{mi} t_{ож}^a n_{ei} \quad (13)$$

где n_{ei} — число ездов i -го типа автосамосвалов за смену, ед.

Для исследования зависимости потерь времени автомобильно-экскаваторных комплексов на ожидание погрузки от структуры парка проведено имитационное моделирование работы комплекса, в результате которого установлены закономерности формирования потерь времени на ожидание погрузки при разнотипной структуре парка самосвалов. Результаты имитационного моделирования согласуются с фактическими данными простоев самосвалов.

На основе результатов имитационного моделирования построен график простоя самосвалов для различных типов машин, направляемых к одному экскаватору, а также график суммарного простоя для разнотипной структуры парка самосвалов $t_{ож}^a$ для различных значений доли большегрузных самосвалов η_m (рис. 1).

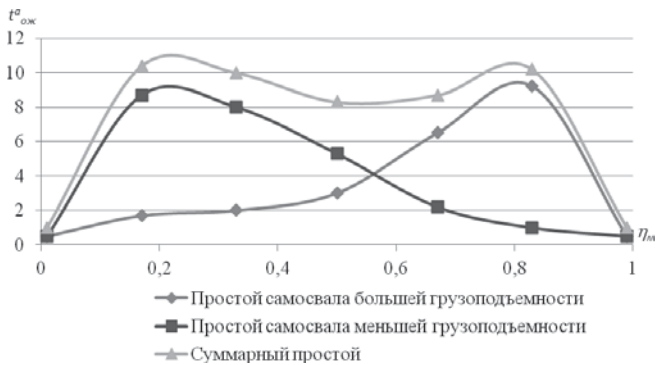


Рисунок 1 — Зависимость $t_{ож}^a$ от η_m

Анализируя данные графиков на рис. 1, можно сделать следующие выводы. Во-первых, потери самосвалов на ожидание погрузки $t_{ож}^a$ стремятся к нулю при $\eta_m=0$ и $\eta_m=1$, т. е. к однотипной структуре парка. Во-вторых, в области действительных значений показателя η_m от 0 до 1 существует такое рациональное соотношение количества автосамосвалов различных типов, при котором их работа с конкретным типом экскаватора характеризуется минимальными совокупными потерями всех автосамосвалов $t_{ож}^a$ в ожидании погрузки.

Запишем в общем виде модель формирования оптимального закрепления автосамосвалов различной грузоподъемности за экскаватором

$$s(t_{ож}^a) = \{A_m, \eta_m\} \longrightarrow Opt, \quad (14)$$

где $s(t_{ож}^a)$ — вектор оптимальных параметров закрепления автосамосвалов за экскаватором, обеспечивающих минимальные потери времени $t_{ож}^a$.

Однако оптимальное решение по (14) не всегда достижимо на практике, так как необходимого количества самосвалов каждого типа может не быть в наличии у предприятия. Поэтому задача (14) может иметь ограничения на структуру парка и сводится к поиску рационального закрепления самосвалов к экскаваторам с целью минимизации $T_{ож}^a$.

Задача рационального закрепления имеющегося количества A_{mij} автосамосвалов различных i -х типов за j -ми экскаваторами формулируется следующим образом: необходимо найти такой вектор s^* из множества соотношений структуры парка самосвалов S , чтобы величина совокупных потерь времени на ожидание погрузки всех автосамосвалов к экскаватору $T_{ож}^a = F[s^*, t_{ож}^a(s^*)]$ была меньше, чем $T_{ож}^a = F[s, t_{ож}^a(s)]$ для любого другого $s \in S$,

$$T_{ож}^{*a} = F(s^*, t_{ож}^a(s^*)) \longrightarrow \min, \text{ при } \sum_{j=1}^m A_{mij} \leq A_{mi} \quad (15)$$

На основе методов линейного программирования разработана и решена математическая модель рационального закрепления автосамосвалов за экскаваторами при обеспечении бесперебойной работы экскаваторов и с учетом структуры парка самосвалов.

Пусть в карьере работает некоторое количество A_{mj} j -го типа экскаваторов, для обслуживания которых имеется определенное количество A_{mi} автосамосвалов i -го типа, различающихся технико-эксплуатационными показателями, в том

числе величиной номинальной грузоподъемности q_i . Транспортировка руды от j -х экскаваторов осуществляется на перегрузочный склад по маршрутам заданной длины l_j . Перевозка руды i -м самосвалом по маршруту характеризуется совокупностью условий: скоростью движения автосамосвала в груженом $v_{зрj}$ и порожнем $v_{порj}$ состояниях, временем погрузки $t_{пj}$ и разгрузки $t_{рj}$ автосамосвала.

Для бесперебойной работы экскаваторов при любых возможных вариантах закрепления автосамосвалов за экскаваторами должно соблюдаться условие (7), поэтому для каждого i -го самосвала рассчитывается величина t_{nij}^{\min} при его работе с j -м экскаватором. Соблюдение планового ритма работы R_{nj} j -го экскаватора обеспечивается путем выпуска на j -й маршрут достаточного количества самосвалов A_{mj} по формуле (10).

Потери времени на ожидание самосвалами погрузки $t_{ожij}$ образуются, если время погрузки i -го типа самосвала $t_{пj}$ при работе с j -м экскаватором будет превышать величину планового интервала движения I_{nj} . Тогда с учетом (7) определим

$$t_{ожij} = t_{пj} - I_{nj} = t_{пj} - t_{пj}^{\min} \quad (16)$$

Обозначим: x_{ij} — количество i -го типа самосвалов, распределенных к j -му экскаватору; a_1, a_2, \dots, a_n — количество самосвалов каждого типа, работающих в карьере; b_1, b_2, \dots, b_m — количество самосвалов по (10), необходимых для закрепления к каждому экскаватору, чтобы исключить их простои. При этом должны соблюдаться балансовые условия

$$\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^m b_j, \quad (17)$$

Если условие (17) не соблюдается, то для решения задачи добавляется «фиктивный» тип самосвала $A_{мф}$ в количестве

$$a_{\phi} = \sum_{j=1}^m b_j - \sum_{i=1}^n a_i \quad (18)$$

или «фиктивный» экскаватор $A_{эф}$, для обслуживания которого потребуется автосамосвалы в количестве

$$b_{\phi} = \sum_{i=1}^n a_i - \sum_{j=1}^m b_j. \quad (19)$$

Математическая модель задачи закрепления самосвалов записывается следующим образом:

$$F = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ожij} x_{ij} \longrightarrow \min \quad (20)$$

$$\text{при: } \sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j, i = 1 \dots n; \sum_{j=1}^m x_{ij} = a_i, j = 1 \dots m; \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^m b_j, x_{ij} \geq 0.$$

Для решения сформулированной задачи могут быть использованы методы линейного программирования: метод потенциалов, симплекс-метод и др.

Разработанная оптимизационная задача обеспечивает выбор такого варианта распределения, при котором совокупные простои автомобильно-экскаваторного комплекса в карьере будут минимальными. С использованием разработанной модели произведено перераспределение автосамосвалов для Качарского карьера АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» (Казахстан): в карьере с автотранспортом ра-

ботают 8 экскаваторов различных типов (ЭКГ-8, CAT-993K, Hitachi 3600, Hitachi 5500); парк самосвалов состоит из 35 машин различных типов (БелАЗ-7513, БелАЗ-7514, CAT-777 и Hitachi EH 3500), которые перевозят руду на два перегрузочных склада с разной дальностью перевозки. Плановый интервал движения $I_{пл}$ установлен по величине t_n для CAT-777. Были рассчитаны все необходимые показатели и найдено решение рационального закрепления самосвалов за экскаваторами. Полученное решение является рациональным из допустимых, но его реализация связана с возможными совокупными простоями самосвалов в количестве 11,1 мин за один цикл оборота всех машин. Также установ-

лено, что полученное решение при существующей структуре парка самосвалов допускает периодическое возникновение простоев экскаваторов по причине нехватки машин. Для исключения простоев экскаваторов рекомендовано увеличить количество самосвалов в карьере CAT-777 на 15 единиц. Согласно выполненным оценкам, общий экономический эффект за счет сокращения времени простоев в ожидании погрузочных работ и снижения экономических потерь от неотгруженной горнорудной массы на предприятиях АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» составляет 40 666,9 тыс. руб. в год.

Литература

1. Васильев М.В., Смирнов В.П., Кулешов А.А. Эксплуатация карьерного автотранспорта : учебник. М. : Недра, 1979. 280 с.
2. Дадонов М.В. Повышение эффективности работы карьерного автомобильного транспорта методами и средствами оперативного управления : дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 1999. 189 с.
3. Зырянов Н.В., Зырянов И.В. Исследование скоростных режимов движения карьерных автосамосвалов в различных дорожных условиях // Цветная металлургия. 1994. № 2. С. 24 — 26.
4. Ларин О.Н., Вуейкова О.Н. Факторный анализ производительности карьерного автотранспорта Сарбайского карьера // Транспорт: наука, техника, управление. 2011. № 1. С. 29 — 32.
5. Белый О.В., Гурков Р.М., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Направления информационных технологий для повышения безопасности транспортных комплексов // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 18. С. 22 — 25.
6. Куватов В.И., Смирнов А.С., Шолин Н.А. Алгоритмическая модель обоснования требований к оперативной информации национального центра управления в кризисных ситуациях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2008. Т. 8. № 4. С. 157 — 162.
7. Смирнов В.П. Обоснование и оптимизация параметров технологического автомобильного транспорта рудных карьеров : дис. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 1990. 298 с.
8. Вуейкова О.Н., Ларин О.Н. Оценка влияния горно-технических факторов на эксплуатационные параметры карьерных автосамосвалов // Транспорт: наука, техника, управление. 2011. № 7. С. 34 — 36.
9. Вуейкова, О.Н., Ларин О.Н. Вопросы повышения эффективности работы карьерного автотранспорта // Вестник ОГУ. 2011. № 10 (129). С. 20 — 25.

References

1. Vasilyev M.V. Ekspluatatsiya karyernogo avtotransporta [Operation of open-pit vehicles]: textbook / M.V. Vasilyev, V.P. Smirnov, A.A. Kuleshov. M.: Nedra, 1979. 280 p.
2. Dadonov M.V. Povyshenie effektivnosti raboty karyernogo avtomobilnogo transporta metodami i sredstvami operativnogo upravleniya: [Improving the efficiency of open-pit motor transport using operational management methods and means] Engineering PhD Thesis. Kemerovo, 1999. 189 p.
3. Zyryanov N.V., Zyryanov I.V. Issledovanie skorostnykh rezhimov dvizheniya karyernykh avtosamosvalov v razlichnykh dorozhnykh usloviyakh [Study of high-speed driving modes of open-pit dump trucks in various road conditions] // Tsvetnaya metallurgiya. 1994. No.2. P. 24–26.
4. Larin, O.N., Vuyekova O.N. // Faktorny analiz proizvoditel'nosti karyernogo avtotransporta Sarbayskogo karyera [Factor analysis of Sarbaysky Open Pit transport performance] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2011. No.1. P. 29–32.
5. Bely O.V. Napravleniya informatsionnykh tekhnologiy dlya povysheniya bezopasnosti transportnykh kompleksov [Directions of information technology to improve transport complexes safety] / O.V. Bely, R.M. Gurkov, D.A. Skorokhodov, A.L. Starichenkov // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2008. No. 18. P. 22–25.
6. Kuvatov V.I., Smirnov A.S., Sholin N.A. Algoritmicheskaya model obosnovaniya trebovaniy k operativnoy informatsii natsionalnogo tsentra upravleniya v krizisnykh situatsiyakh [Algorithmic model for substantiation of requirements to operational information of the National Center for Crisis Management] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2008. T. 8. No. 4. P. 157–162.
7. Smirnov, V.P. Obosnovanie i optimizatsiya parametrov tekhnologicheskogo avtomobilnogo transporta rudnykh karyerov [Justification and optimization of parameters of ore pits support motor vehicles]: Engineering DSc Thesis. Novosibirsk, 1990. 298 p.
8. Vuyekova O.N., Larin O.N. Otsenka vliyaniya gornotekhnicheskikh faktorov na ekspluatatsionnye parametry karyernykh avtosamosvalov [Assessment of the impact of mining factors on operational parameters of open pit dump trucks] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2011. No.7. P. 34–36.
9. Vuyekova, O.N., Larin O.N. Voprosy povysheniya effektivnosti raboty karyernogo avtotransporta [Issues of increase in efficiency of open pit transport] // Vestnik OGU. 2011. No.10 (129). P. 20–25.

УДК 656.212.3/.5

Павел Станиславович Бурдяк, инженер, технолог I категории технологической службы Западно-Сибирской железной дороги — филиала ОАО «РЖД»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК ПЕРЕЛОМА ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ В ВЫХОДНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНОГО ПАРКА

Pavel S. Burdyak, engineer, 1st category technician of Technology Service of West-Siberian railway — JSC «RZD» branch

Determining Location Of Fracture Points Of Longitudinal Profiles In The Exit Section Of Marshalling Yard

Аннотация

В статье представлена методика определения положения точек перелома продольного профиля сортировочных путей при расформировании составов одиночными изолированными толчками. Данная методика позволяет проводить анализ конструкции существующих или определять параметры вновь проектируемых парковых путей негорочных сортировочных устройств.

Ключевые слова: сортировочное устройство, продольный профиль сортировочного пути, одиночные изолированные толчки, энергетическая высота, скатывание отцепов, расчетные бегуны.

Abstract

The paper describes a method of determining the location of fracture points of longitudinal profile of marshalling tracks in case of train splitting with single isolated jerks. This method allows to analyze design of existing or determine the parameters of newly designed body tracks of non-hump marshalling facilities.

Keywords: marshaling facility, longitudinal profile of marshalling track, single isolated jerks, power height, cut rolling, design cars running from the hump yard.

Расформирование составов методом одиночных изолированных толчков (ОИТ) применяется и на станциях общей сети железных дорог, и на станциях промышленных предприятий. Параметры используемых при этом сортировочных устройств зависят от ряда таких факторов, как

- структура перерабатываемого вагонопотока;
- метеорологические условия местности;
- начальная скорость движения отцепа после толчка и др.

Необходимое условие реализации технологии расформирования составов способом ОИТ — это значение уклона стрелочной зоны, при котором исключается остановка отцепов в пределах стрелочной зоны после толчка [1].

Выполнение маневровой работы по расформированию составов требует обеспечения необходимой дальности проследования отцепов в парк. При накоплении вагонов нужна высокая степень заполнения путей парка за счет снижения количества и размера «окон» между вагонами. Исключение остановки отцепов в начальной части парка позволяет снизить количество соударений отцепов со стоящими на пути вагонами со скоростями, превышающими допустимые [2].

Согласно действующим нормативам [3], основная часть сортировочных путей должна проектироваться на сплошном ускоряющем уклоне, кроме последнего участка длиной 100 м, который совместно с выходной горловиной парка должен располагаться на подъеме 2‰. При этом не уточняется способ выполнения сортировочной работы и протяженность сортировочных путей. На многих станциях сортировка вагонов выполняется на путях ограниченной емкости (например, на группировочных или тупиковых сортировочных путях). Следовательно, определение положения точек перелома продольного профиля сортировочных путей является актуальной задачей для повышения безопасности и эффективности работы сортировочных устройств способом ОИТ.

В данной работе *объект исследования* — продольный профиль сортировочных путей, используемых для накопления вагонов при расформировании состава способом ОИТ.

Предмет исследования — процессы движения отцепов в сортировочном парке после выполнения толчка.

Цель исследования заключается в разработке методики определения положения точек перелома продольного профиля в выходной части сортировочного парка при расформировании составов способом ОИТ.

Максимальное значение потребной дальности пробега отцепа от точки отрыва (после толчка) в парк должно устанавливаться с учетом рационального использования полезной длины сортировочных путей. Точка остановки отцепа не должна располагаться в пределах участка выходной части пути, расположенной на противоуклоне, который, согласно [3], устраивается на приемоотправочных и сортировочных путях для исключения возможности выхода подвижного состава за пределы полезной длины парка.

Если при расформировании состава одиночными изолированными толчками головной отцеп будет остановлен в пределах участка пути с противоуклоном, то возникает возможность его обратного движения (навстречу движущимся отцепам), что негативно отразится на безопасности производства маневровой работы. Кроме того, при обратном движении сокращается потребная емкость пути накопления вагонов. В связи с этим целесообразно в качестве максимальной потребной дальности пробега отцепа установить точку начала участка с противоуклоном в выходной части парка.

Расположение точки перелома профиля в выходной части парка следует определять с учетом выполнения следующих условий.

Условие 1 — протяженность и крутизна уклона участка пути, расположенного на спуске, должны обеспечивать исследование отцепов в глубь парка до начала участка противоуклона.

Условие 2 — протяженность и крутизна участка противоуклона должны исключать возможность выхода отцепов за пределы полезной длины пути.

Протяженность и крутизна уклонов участков пути, расположенных на спуске и противоуклоне, находятся в прямой зависимости. Изменение длины и уклона участка пути, расположенного на спуске ($l_{\text{сп}}$, $i_{\text{сп}}$), приводит к необходимости изменения длины и уклона участка пути, расположенного на противоуклоне ($l_{\text{прот}}$, $i_{\text{прот}}$). Определение места расположения точки перелома продольного профиля и крутизны участков пути парка целесообразно выполнять на основании решения следующих задач.

1. Протяженность и крутизна участка пути, расположенного на спуске, должна обеспечивать докатывание расчетного бегуна до точки перелома профиля в выходной части парка (начала противоуклона) при скатывании отцепа в неблагоприятных метеорологических условиях. В качестве расчетного бегуна при решении данной задачи целесообразно использовать расчетный бегун Х. Выбор данного типа бегуна обусловлен следующим.

Для расчета максимальной потребной дальности пробега в соответствии с [3] можно использовать расчетные бегуны Х или ОХ-85.

Применение бегуна ОХ-85 в данном случае приведет к сокращению длины участка пути парка, расположенного на спуске, а значит, и полезной вместимости парка.

При использовании расчетного бегуна Х обеспечивается высокая степень заполнения путей накопления.

2. Протяженность и крутизна участка пути, расположенного на противоуклоне, должна исключать возможность выхода расчетного бегуна за пределы полезной длины пути при скатывании отцепа в благоприятных метеорологических условиях. В качестве расчетного бегуна при решении данной задачи следует использовать расчетный бегун ОХ-85. Выбор данного типа бегуна обусловлен следующим.

Согласно [3], расчетный бегун ОХ-85 обладает наилучшими ходовыми свойствами, что целесообразно для установления условий, исключающих выход отцепов за пределы полезной длины путей парка после толчка.

Использование ОХ-100 в данном случае приведет к сокращению длины участка пути парка, расположенного на спуске, а значит, и полезной вместимости парка. Кроме того, расчетный бегун ОХ-100 рекомендуется применять для решения задач проверки мощности тормозных средств [3].

При появлении отдельного отцепа в составе, соответствующего характеристикам ОХ-100, необходимо учитывать дополнительные (кроме участка противоуклона) возможности сокращения дальности пробега такого отцепа в парк, в частности:

- торможение ОХ-100 на тормозной позиции;
- наличие вагонов на пути назначения при толчке ОХ-100;
- укладку охранных башмаков в выходной части парка.

Определение положения точки перелома профиля производили на основании итерационных расчетов. При этом в качестве начального значения были приняты следующие параметры участка пути парка, расположенного на противоуклоне [3]:

- длина 100 м;
- значение противоуклона 2‰.

Расчет выполняли в следующей последовательности.

1. При заданных параметрах противоуклона определяли уклон пути парка, расположенный на спуске, путем решения указанной выше задачи для расчетного бегуна Х.

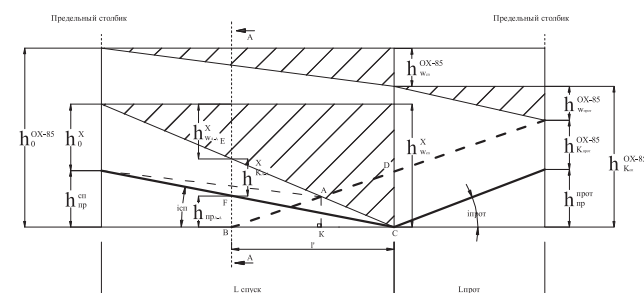
2. После определения уклона участка пути, расположенного на спуске, проверяли возможность остановки бегуна ОХ-85 на противоуклоне. Если при рассчитанных значениях уклонов и крутизны участков пути парка обеспечивается остановка бегуна ОХ-85 в пределах полезной длины пути, то задачу считали решенной и положение точки перелома продольного профиля в парке не меняли.

3. Если при рассчитанных значениях уклонов и крутизны участков пути парка не выполнялась остановка бегуна ОХ-85 в пределах полезной длины пути, то длину участка, расположенного на противоуклоне, увеличивали до тех пор, пока не обеспечивалась остановка ОХ-85 в указанных границах. При этом увеличение длины участка противоуклона производили за счет уменьшения длины участка пути парка, расположенного на спуске. Вследствие выполнения указанной корректировки положения точки перелома продольного профиля

парка создавали условия для обратного движения Х-бегуна, так как точка его остановки смещалась в пределы участка, расположенного на противоуклоне. В связи с этим возникала необходимость поиска оптимального положения точки перелома продольного профиля и значения уклона участка пути, расположенного на спуске, при которых обеспечивается выполнение указанных выше условий проследования расчетных бегунов Х и ОХ-85 в парк.

Метод исследования. Задачу поиска оптимального положения точки перелома продольного профиля и значения уклона участка пути, расположенного на спуске, решали с использованием основного уравнения движения отцепа в энергетических высотах [4]. Расчетная схема процессов движения бегунов X и OX-85 в пределах полезной длины пути для принятых условий преследования расчетных бегунов в парк после толчка представлена на рис. 1. Исходные данные для решения задачи:

- уклон и протяженность участка пути, расположенного на спуске, определенные по условию докатывания расчетного бегуна X до начала участка, расположенного на противоуклоне;
- уклон и протяженность участка пути, расположенного на противоуклоне (принимается согласно [3]);
- начальная скорость движения расчетного бегуна при вступлении на путь (определяли на основании моделирования движения отцепа после толчка [1]).



Условные обозначения:

— — продольный профиль сортировочного пути, при котором будут обеспечиваться решения задач движения бегунов Х и ОХ-85;

---- — продольный профиль сортировочного пути, при котором будут обеспечиваться решения задач движения бегунов X и OX-85

Рисунок 1 — Расчетная схема процессов движения бегунов X и ОХ-85 в пределах полезной длины пути

На рис. 1:

$h_0^{\text{OX-85}}$ — энергетическая высота, соответствующая скорости движения расчетного бегуна ОХ-85 в начале пути парка (условия благоприятные);

h_0^x — энергетическая высота, соответствующая скорости движения расчетного бегуна X в начале пути парка (условия неблагоприятные);

$h_{\text{пр}}^{\text{сп}}$ — профильная высота участка пути парка, расположенного на спуске;

$h_{\text{вн}}^{\text{OX-85}}$ — энергетическая высота, соответствующая работе сил сопротивления движению расчетного бегуна ОХ-85 по участку пути парка, расположенного на спуске (условия благоприятные);

$h_{\text{всх}}^x$ — энергетическая высота, соответствующая работе сил сопротивления движению расчетного бегуна X по участку пути парка, расположенного на спуске (условия неблагоприятные);

$h_{\text{Ксн}}^{\text{ОХ-85}}$ — энергетическая высота, соответствующая скорости движения расчетного бегуна ОХ-85 в конце участка пути, расположенного на спуске (условия благоприятные);

$h_{\text{пр}}^{\text{прот}}$ — профильная высота участка пути парка (100 м), расположенного на противоуклоне;

$h_{\text{Упор}}^{\text{OX-85}}$ — энергетическая высота, соответствующая работе сил сопротивления движению расчетного бегуна ОХ-85 по участку пути парка (100 м), расположенного на противоуклоне (условия благоприятные);

$h_{\text{Курор}}^{\text{OX-85}}$ — энергетическая высота, соответствующая скорости движения расчетного бегуна ОХ-85 в конце участка пути (100 м), расположенного на противоуклоне (условия благоприятные):

$h_{w_{A-A}}^x$ — энергетическая высота, соответствующая работе сил сопротивления движению расчетного бегуна X на участке от начала пути парка до сечения $A — A$ (условия неблагоприятные);

h_{K-A-A}^x — энергетическая высота, соответствующая скорости движения расчетного бегуна X в сечении $A-A$ (условия неблагоприятные);

$h_{\text{пр.а-а}}$ — профильная высота участка пути, расположенного на спуске, в пределах между сечением $A-A$ и началом противуклона;

$L_{\text{спуск}}$ — длина участка пути, расположенного на спуске;

$L_{\text{прот}}$ — длина участка пути, расположенного на противоиюконе (принимается 100 м);

$i_{\text{сп}}$ — величина уклона участка пути, расположенного на спуске;

$i_{\text{прот}}$ — величина уклона, участка пути, расположенного на противоуклоне (принимается 2‰);

l' — расстояние смещения точки начала противоуклона для обеспечения остановки ОХ-85 в конце участка пути, расположенного на противоуклоне.

Так как скатывание расчетного бегуна Х осуществляется в неблагоприятных условиях, а ОХ-85 — в благоприятных, то для решения задачи поиска точки перелома профиля связь расчетных схем скатывания бегунов устанавливается через избыточное значение энергетической высоты расчетного бегуна ОХ-85 в конце участка пути, расположенного на противоуклоне ($h_{\text{конец}}^{\text{ОХ-85}}$).

Для обеспечения остановки расчетного бегуна ОХ-85 необходимо увеличить протяженность участка пути, расположенного на противоуклоне, на величину l' , как показано на схеме (см. рис. 1). Для решения задачи скатывания X бегуна необходимо найти положение точки A с изменением значения уклона участка пути, расположенного на спуске. Таким образом, согласно расчетной схеме, определение положения точки перелома продольного профиля пути (точка A) сводится к расчету длины отрезков AK и KC .

Необходимое значение смещения (отрезок KC) может быть определено из треугольников ABK и AKC . Требуемое значение величины AK определяется с помощью треугольников DBC и EBC . Для данных треугольников известны значения:

— для ΔDBC

- угол DBC — определяемый через значение противоуклона $i_{\text{прот}}$;
- катет $DC = h_{K_{\text{прот}}}^{\text{OX-85}}$;
- отрезок $l' = \frac{h_{K_{\text{прот}}}^{\text{OX-85}}}{i_{\text{прот}}}$

— для $\triangle EBC$

- отрезок $l' = \frac{h_{K_{\text{прот}}}^{\text{OX-85}}}{i_{\text{прот}}}$;
- отрезок $EB = FB + EF = h_{\text{пр.А-А}} + h_{K_{\text{А-А}}}^x$.

Следовательно, $\angle ECB = \arctg \frac{EB}{BC}$.

Таким образом, в треугольнике ABC известны два угла и одна сторона. По теореме синусов

$$AC = \frac{l' \cdot \sin(\angle ABC)}{\sin(180 - \angle ACB - \angle ABC)}. \quad (1)$$

В прямоугольном треугольнике AKC известны одна сторона и прилегающей к ней угол. Следовательно,

$$KC = AC \cdot \cos(\angle ACB). \quad (2)$$

Из $\triangle DBC$ и $\triangle EBC$ следует:

$$\angle ABC = \arctg(i_{\text{прот}}); \quad (3)$$

$$\sin(\angle ABC) = \sin(\arctg(i_{\text{прот}})); \quad (4)$$

$$\angle ACB = \arctg \frac{EB}{BC} = \arctg \frac{h_{K_{\text{А-А}}}^x + h_{\text{пр.А-А}}}{l'} = \arctg \frac{\frac{V_{\text{Х}}^2}{2g'} + i_{\text{сп}} \cdot l' \cdot 10^{-3}}{l'}, \quad (5)$$

где $V_{\text{Х}}^2$ — скорость расчетного бегуна X в сечении A — A .

Итоговые выражения для определения положения точки перелома продольного профиля в пространстве имеют вид:

$$KC = \frac{l' \cdot \sin(\arctg(i_{\text{прот}})) \cdot \cos(\arctg(i_{\text{прот}}))}{\sin \left(180 - \arctg \left(\frac{\frac{V_{\text{Х}}^2}{2g'} + i_{\text{сп}} \cdot l' \cdot 10^{-3}}{l'} \right) - \arctg(i_{\text{прот}}) \right)}; \quad (6)$$

$$AK^2 = AC^2 - KC^2; \quad (7)$$

$$AC = \frac{KC}{\cos(\angle ACB)}; \quad (8)$$

$$AK = \sqrt{\left(\frac{KC}{\cos(\angle ACB)} \right)^2 - KC^2}. \quad (9)$$

Таким образом, итоговое значение уклона участка пути, расположенного на спуске ($i_{\text{сп}}^{\text{I}}$), обеспечивающее решение задач скатывания расчетных бегунов X и OX-85 , можно определить по формуле

$$i_{\text{сп}}^{\text{I}} = \frac{h_{\text{пр}}^{\text{сп}} - AK}{(l_{\text{сп}} - KC) \cdot 10^{-3}}. \quad (10)$$

Решение указанных задач для определения максимальной потребной дальности пробега отцепов от точки отрыва в парк необходимо выполнять для каждого пути сортировочного устройства, предназначенного для расформирования состава одиночными изолированными толчками.

Пример практического решения задачи

На основе данной методики проведены проверочные расчеты для заданного объекта прототипа негорочного сортировочного устройства, фрагмент плана которого представлен на рис. 2 [5].

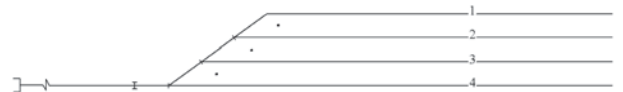


Рисунок 2 — Фрагмент плана негорочного сортировочного устройства

Общие исходные данные для расчета параметров продольного профиля участков стрелочной зоны и пути парка приведены в табл. 1, 2. Данные по благоприятным и неблагоприятным погодным условиям для целей исследования были приняты по условиям расположения железнодорожной станции Инской.

Таблица 1 — Данные по метеорологическим условиям для движения расчетных бегунов

Метеорологические условия	Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Угол обдувания, град
Благоприятные	9,57	3,10 (попутный)	12
Неблагоприятные	-6,97	3,32 (встречный)	33

Таблица 2 — Характеристики расчетных бегунов

Параметры	Числовые характеристики расчетных бегунов (вагонов)			
	П	Х	ОХ-85	ОХ-100
Расчетный вес q , тс	25	70	85	100
Основное удельное сопротивление $\omega_{\text{пр}}$, кгс/тс	4	0,8	0,5	0,5

На основании проведенных расчетов получены параметры стрелочной зоны и путей парка, удовлетворяющие условию докатывания X -бегуна до начала противоуклона (рис. 3). Для проверки остановки бегуна OX-85 на противоуклоне при прохождении по выбранному для бегуна X уклону пути приняты благоприятные условия, приведенные в табл. 1. На основании расчетов и выполненной корректировки длины противоуклона получены параметры стрелочной зоны и пути парка, удовлетворяющие условию исключения выхода бегуна OX-85 за пределы полезной длины пути. Полученные параметры для рассматриваемого сортировочного устройства изображены на рис. 3.

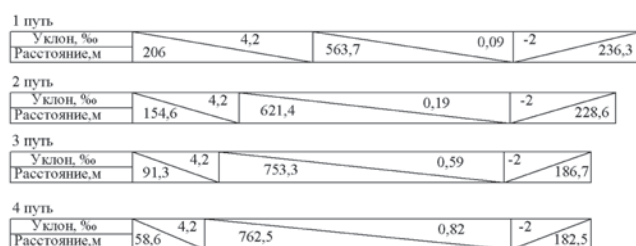


Рисунок 3 — Расчетные параметры элементов продольного профиля стрелочной зоны и путей парка

Вывод

Предложенный метод определения точек перелома профиля путей в выходной части парка целесообразно использовать в расчетах необходимой (по технологии работы станции) длины и крутизны участков сортировочных (группировочных) путей, а также для оценки существующего продольного профиля парковых путей при расформировании составов способом одиночных изолированных толчков.

Литература

- Бурдяк П.С., Климов А.А. Метод расчета уклона стрелочной зоны сортировочного устройства, специализированного для работы одиночными изолированными толчками // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании : матер. междунар. науч.-практ. конф. Одесса, 2010. Т. 1. С. 61 — 68.
- Инструкция по движению поездов и маневровой работе на железных дорогах Российской Федерации ЦД-790. М., 2002. 317 с.
- Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм / МПС РФ. М. : Техинформ, 2003. 168 с.
- Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учебник / Н.В. Правдин, С.П. Вакуленко, А.К. Головнич и др. М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. 1086 с.
- Климов А.А., Бурдяк П.С. Методика определения параметров негорочного сортировочного устройства для расформирования составов одиночными изолированными толчками : матер. межрегион. науч.-практ. конф. с международным участием. 9-10 декабря 2010 г. Хабаровск : ДавГУПС, 2010. Т. 1. С. 85 — 89.

References

- Burdyak P.S., Klimov A.A. Metod rascheta uklona strelochnoy zony sortirovochnogo ustroystva spetsializirovannogo dlya raboty odinochnymi izolirovannymi tolchkami [Method of calculating the slope of marshaling facility arrow zone specialized for operation with single isolated jerks] // Modern problems and their solutions in science, transport, and education: Proceedings of the International Scientific Conference. Volume 1. Odessa, 2010. P. 61 — 68.
- Instruktsiya po dvizheniyu poezdov i manevrovoy rabote na zheleznikh dorogakh Rossiyskoy Federatsii: [Instruction on train traffic and shunting operations on railways of the Russian Federation] TsD-790. M., 2002. 317 p.
- Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznikh dorogakh kolei 1520 mm [Design regulations and standards for marshaling facilities at 1520 mm gauge railways] / MPS RF. M.: Tekhinform, 2003. 168 p.
- Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly) [Design of railway transport infrastructure (stations, railway and transport nodes)]: textbook /N.V. Pravdin, S.P. Vakulenko, A.K. Golovnich et al. M.: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2012. 1086 p.
- Klimov A.A., Burdyak P.S. Metodika opredeleniya parametrov negorochnogo sortirovochnogo ustroystva dlya rasformirovaniya sostavov odinochnymi izolirovannymi tolchkami [Method of calculation of non-hump marshaling facility parameters for train splitting with single isolated jerks] // Proceedings of the Interregional Scientific and practical conference with international participation, December 9-10, 2010. Vol. 1 /DavGUPS .Khabarovsk. 2010. P. 85 — 89.

УДК 65.011.46

Мария Александровна Рудникова, менеджер по развитию партнерских проектов ООО «Мерк», отдел «Развитие и повышение эффективности бизнеса», соискатель кафедры «Системное управление транспортными комплексами», МИИТ, Вячеслав Борисович Ручкин, кандидат технических наук, доцент, управляющий делами ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения»

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Maria A. Rudnikova, manager of joint projects development, LLC "Merck", "Business development and effectiveness improvement" Department, PhD student of «System management of transport complexes» Chair, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Vyacheslav B. Ruchkin, PhD, associate professor, executive officer of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

Evaluation Of The Socio-Economic System Performance Effectiveness

Аннотация

Авторы исследуют применимость для оценки эффективности деятельности социально-экономической системы модели производственного потенциала и теории X-эффективности. В ходе исследования проводится процедура оценки набора факторов производства, рассматриваются сопутствующие производственные факторы, приводящие к неэффективности в рамках оценки деятельности исследуемого объекта управления. Эмпирическая модель не только вмещает гетероскедастичность, но и представляет модель производственного процесса, не всегда обладающего максимально возможным результатом.

Ключевые слова: показатели эффективности, эффект от управления, управление социально-экономическими системами, организационное управление, техническая эффективность, модель производственного потенциала, стохастическая граница.

Abstract

The authors assess the applicability of the model of stochastic production frontier and X-efficiency theory for the performance efficiency evaluation. During the study procedure production factors set is evaluated, besides, co-production factors and factors of inefficiencies are considered. The empirical model both contains heteroscedasticity, and also shows the model of production process, not always producing the maximum possible output.

Key words: efficiency parameters, management efficiency, socio-economical systems management, organizational management, technical efficiency, model of production function, stochastic production frontier.

Объект исследования — социально-экономические отношения, реализуемые в процессе управления объектами транспортного комплекса. В настоящее время большинство исследователей данной области рассматривают процесс управления деятельностью как наиболее значимый для стабильного развития системы управления в целом. Формализованное представление оценки эффективности управления интерпретируется по-разному, существуют уникальные представления для каждого объекта исследования.

В данном исследовании решение задачи оценки эффективности управления рассматривается в рамках общесистемного управления социально-экономическими системами, исключая возможность оценки эффективности относительно характеристик лиц, принимающих управленческие решения. Такой подход к рассмотрению эффективности управления является комплексным, результаты исследования подтверждают связь между набором контролируемых показателей и оценкой эффективности управления.

Исследование проводилось на базе Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), который является основным источником подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадрового состава транспортного комплекса страны. Университетская среда не менялась в значительной степени после перехода на рыночные условия взаимодействия с внешними и внутренними субъектами управления, именно поэтому вопрос обеспечения стабильного развития системы университетского управления является наиболее актуальным [1]. Целью исследовательской работы является формирование уникального пространства параметров для среды управления, применимого в рамках универсализации методики управления социально-экономическим объектом любого транспортного комплекса [2]. Хотя результаты получены для Московского региона, можно полагать, что они типичны и для других областей. В ходе исследования оценка обобщена для отображения на уровне социально-

экономической системы любой этимологии, так как в целом организационные среды имеют единые характеристики управляющих воздействий в ходе принятия управленческих решений [3].

Для достижения поставленной цели была разработана методика выявления параметров оценки эффективности управления [2, 4], включающая следующие этапы:

- выявление показателей для оценки управления социально-экономической системы;
- определение круга ответственных лиц (лиц, принимающих решение);
- обобщение показателей для оценки эффективности управления объектом.

Особенность результирующей модели управления социально-экономической системой заключается в отражении двух векторов оценки системы:

- оценки эффективности отслеживания состояния;
- оценки эффективности деятельности организации.

Оценка эффективности отслеживания состояния значима для лиц, принимающих решение. Максимально заинтересованная сторона в результатах этой оценки — работодатели, потребители продукции вуза, инвесторы и учредители организации. Оценка эффективности деятельности организации интересна всем уровням управления, так как влияет на скорость принятия оперативных и долгосрочных (стратегически значимых) решений.

Существующие методики оценки эффективности не предполагают подобного разделения оценок и не подразумевают включения оценки в общую модель управления системы. В результате реализации предложенной методики [2 — 5] была сформирована модель системы, включающая ключевые управляющие параметры.

Важным условием практической реализации поставленной задачи явился учет существующего набора управляющих параметров, так как они являются привычными для анализа и использования лицом, принимающим решения (ЛПР) в организации. Эти показатели вошли в оценку эффективности деятельности организации ($E_{до}$) и представлены тремя ключевыми параметрами:

$E_{комм}$ — оценка коммерческой эффективности;

$E_{бюдж}$ — оценка бюджетной эффективности;

$E_{соц}$ — оценка социальной эффективности.

Оценка деятельности университета проводилась в двух направлениях: внутри и вне объекта исследования. С этой целью были исследованы следующие системы оценок объекта управления:

- российская рейтинговая оценка (агентство «РейтОР»);
- показатели государственной аккредитации [6];
- международные рейтинговые оценки: «Топ 200», Украина; Webometrics, Испания; Asia's Best Universities (Лучшие университеты Азии), Азия; The Top American Research Universities (Лучшие американские исследовательские университеты), США; CHE and Stern University Rankings (Университетские рейтинги CHE и Stern), Германия; Guide to Universities (Справочник по университетам), Великобритания; Good University Guide (Справочник по образцовым университетам), Великобритания; Берлинские принципы

международной экспертной группы по ранжированию (IREG) [7];

- внутренние показатели оценки эффективности управления (оценивались согласно внутренним отчетам о деятельности социально-экономической системы) [8].

В ходе исследования предполагалось, что для объекта управления существует общепринятое или наиболее применимое деление показателей оценки эффективности деятельности. Оно подразумевает представление информации в зависимости от одного из направлений деятельности каждого подчиненного субъекта управления. Так, для вуза можно выделить следующие направления:

- 1) учебная работа (УР);
- 2) социальная работа (СР);
- 3) научная работа (НР);
- 4) кадровый состав (КС);
- 5) финансово-экономическая деятельность (ФЭД);
- 6) международная деятельность (МД).

Соответствующие результирующие наборы представлены тремя ключевыми показателями: $E_{комм}$, $E_{бюдж}$, $E_{соц}$.

При расчете итоговой эффективности деятельности наиболее применима аддитивная свертка компонентов векторного критерия: представление обобщенного скалярного критерия в виде суммы взвешенных нормированных частных критериев. Так, для исследуемого объекта средняя оценка эффективности деятельности осуществляется при сопоставлении набора оценок по каждому направлению и рассчитывается по формуле

$$\bar{E}_{доi} = \frac{\bar{E}_{бюджi} * \omega_{бюдж} + \bar{E}_{соцi} * \omega_{соц} + \bar{E}_{коммi} * \omega_{комм}}{\omega_{бюдж} + \omega_{соц} + \omega_{комм}}, \quad (1)$$

где $\bar{E}_{до}$ — среднее арифметическое оценки эффективности деятельности объекта;

$\omega_{бюдж}$, $\omega_{соц}$, $\omega_{комм}$ — вес соответствующего показателя в системе оценок;

$i \in \{1 \dots 6\}$, тогда как 1 = УР, 2 = СР, ... 6 = МД (направление представления информации).

В общей совокупности оценок объекта управления был сформирован пул показателей. Внутренние и внешние показатели оценки состояния исследуемого объекта были разделены на количественные и качественные. Количественные включили 263 внутренних и 170 внешних параметров. Качественные показатели представлены 60 параметрами оценки, их анализ в рамках данной статьи не освещается. Далее приводится последовательность оценки только количественных показателей.

Показатели были сгруппированы, дубликаты — исключены, за счет чего их количество уменьшилось. Изначальный анализ групп осуществлялся в соответствии с группами, сформированными на основе внутренней документации (6 ключевых направлений, указанных ранее). Итоговый набор показателей из группы «внутренние» составил после сокращения 177. Итоговый набор показателей из группы «внешние» составил после сокращения 115.

Итого реестр составил 292 параметра. С целью обеспечения эффективного управления необходимо обеспечить ЛПР тем количеством данных, которое будет на начальном уровне

анализа показывать истинное состояние организации. Поэтому задача сводится к выявлению наиболее значимых параметров для предоставления их ЛПР.

Для построения оценки эффективности деятельности проводился корреляционный анализ тесноты связи 292 параметров реестра. Полученные результаты [2, 3] не позволили в полной мере отразить действительную оценку эффективности деятельности и сформировать обоснованную группу показателей для дальнейшего применения ЛПР в ходе принятия решений.

Так как в результирующей модели оценки эффективности управления среди величин имеются случайные, т. е. определяемые лишь некоторыми вероятностными характеристиками, то модель является стохастической. В этом случае и все результаты, полученные при рассмотрении модели, имеют стохастический характер и должны быть соответственно интерпретированы. В ходе исследования делается предположение, что деятельность лица, принимающего решения, направлена на эффективное использование основных производственных ресурсов. Возникающая же неэффективность связана лишь с факторами внешнего окружения, которые сопровождают производственный процесс.

Модель производственного потенциала и теории X -эффективности позволяет провести процедуру оценки набора факторов производства и наряду с основными рассматривать сопутствующие производственные факторы в рамках оценки эффективности деятельности. Исследования модели производственного потенциала применялись для различных отраслей промышленности в странах Европейского союза [9]. Исследования в рамках общесистемного университетского управления на базе указанной модели ранее не проводились, что обуславливает новизну предложенной модели оценки эффективности деятельности наряду с ранее известными.

Идентификация степени воздействия факторов эффективности является одной из основных задач методологии стохастической границы [10, 11], которая приводит к известной модели стохастического граничного производственного потенциала и позволяет получить оценки технической эффективности производства [12].

В качестве объединения производителей может быть рассмотрен университет как совокупность институтов, факультетов и кафедр. Целевым субъектом, или лицом, заинтересованным деятельностью исследуемой группы, выступает руководитель этой группы (ректор).

Приведем пример построения оценки эффективности деятельности для направления «научная работа».

Построение оценки осуществляется для целевого критерия — количества статей (печатных листов). Результирующая оценка будет отражена в виде укрупненного показателя $E_{доНР}$ — (оценка эффективности деятельности направления «научная работа»). Исследования показали, что в основном только кандидаты или доктора наук обеспечивают рост этого показателя. Поставлена задача: оценить потенциальные возможности институтов, факультетов, кафедр, выявить факторы неэффективности и оценить степень их воздействия на результаты труда.

Для решения поставленной задачи в рамках построения модели производственного потенциала предлагается потенциал объединения измерять в трех формах:

- исходный потенциал, определяемый количеством трудовых ресурсов — количеством докторов и кандидатов наук;
- фактический потенциал, выраженный результатами труда — количеством изданной учебно-методической литературы, монографий, журналов, сборников научных трудов, необходимых для научно-образовательных целей;
- граничный потенциал, равный максимально возможному фактическому потенциалу. Граничный потенциал позволяет оценить степень возможного проявления способностей исходного потенциала, т. е. производственные возможности исходного потенциала.

Графически связь трех форм потенциала можно отобразить в виде, представленном на рис. 1. Ось абсцисс (ось X) является осью исходного потенциала. На ней откладывается возрастающее количество персонала. Ось ординат (Y) — ось фактического потенциала. По оси Y откладывается объем произведенного продукта — количество статей в печатных листах. По крайним верхним точкам можно провести линию, огибающую эмпирический материал сверху. Если есть возможность определить функциональную зависимость данной огибающей, то будет построена функция граничного потенциала $Y = f(x)$, являющаяся границей производственных возможностей.

Для построения оценки технологической эффективности исходного потенциала, равного величине X_m , используется отношение вида $TE_m = Y_m/Y_f$, где Y_m — фактический потенциал, Y_f — граничный потенциал.

Точки, лежащие на границе производственных возможностей, считаются технологически эффективными, т. е. для них значение технологической эффективности равно единице.

В работе на эмпирическом материале из 5 наблюдений конструируется функция, описывающая границу производственных возможностей группы докторов и кандидатов институтов (кафедр, факультетов), результатом деятельности которых выступает годовой объем работ в печатных листах при условии работы с заданным количеством студентов очного обучения в течение этого же года.

Недостатком подхода при построении граничной функции является отсутствие возможности управления производственным процессом. Модель производственного потенциала допускает усовершенствование. Разделение факторов неэффективности на управляемые и неуправляемые позволяет выполнить построение управляемой границы.

Методика стохастической граничной производственной функции [13, 14] дает возможность отобразить это разделение

$$Y_{it} = \exp(x_{it}\beta + v_{it} - u_{it}). \quad (2)$$

где Y_{it} — производственная функция в периоде t ($t = 1, 2, \dots, T$) для организации i ($i = 1, 2, \dots, N$);

x_{it} — представляет собой вектор входных значений производственной функции в периоде t ($t = 1, 2, \dots, T$) для организации i ($i = 1, 2, \dots, N$);

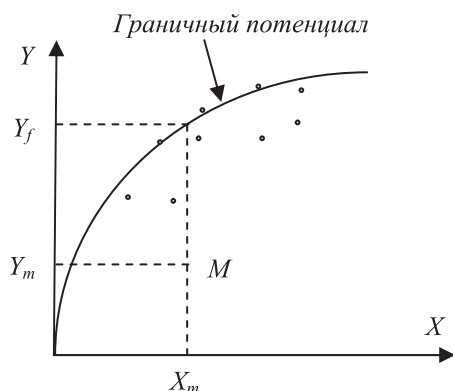


Рисунок 1 — Графическая связь трех форм потенциала

β — вектор неизвестных параметров, которые необходимо оценить в ходе исследования;

$v_{it} \in N(0, \sigma_v^2)$ — набор неопределенных ошибок, независимо распределенных относительно u_{it} ;

$u_{it} \in N^+(\mu_i, \sigma_u^2)$ — усеченное нормальное распределение неотрицательных случайных переменных, ассоциированных, согласно предположению, с независимо распределенной технической эффективностью производственной функции со средней δz_i и отклонением σ^2 ;

$\mu_i = \delta z_i$ — функция неэффективности,

где $z_i = (1, z_{i1}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{im})$ — вектор значений факторов неэффективности для i -го наблюдения;

$\delta = (\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_j, \dots, \delta_m)$ — вектор параметров функции неэффективности.

Для определения набора управляемых факторов в рамках уменьшения количества параметров в модели оценки эффективности деятельности проведены итерации исключения неуправляемых факторов. В результате выдвинутого предположения о том, что ряд факторов управляем, другой ряд — неуправляем, после исключения неуправляемого фактора проходила повторная оценка эффективности. Если исключение этого фактора не приводило к значительному изменению функций эффективности и неэффективности, тем самым не оказывало воздействий на результирующие значения исследования, то фактор был определен как неуправляемый. Таким образом, в рамках исследования был получен оптимальный набор значимых факторов, подлежащих управлению.

Приведем последовательность исключения неуправляемых факторов при формировании результирующей оценки социальной эффективности деятельности для направления «научная работа». По результатам анализа группы произведено уменьшение количества управляемых факторов в рамках четырех итераций. В табл. 1 представлены детали итерации № 1. Параметры, отмеченные жирным шрифтом, исключены.

По результатам итерации № 4 дальнейшее проведение процедуры сокращения параметров приведет к значительному изменению значения функции неэффективности (от -0,000119 до +0,000074), таким образом, в результирующую оценку представляется целесообразным включение не менее

Таблица 1 — Значения оцениваемых параметров и их статистики: оценка социальной эффективности ($E_{соц\ НР}$)

Parameter	Delta	Coefficient	Standard-error	T-ratio
	<i>delta0</i>	0,000000	1,000000	0,000000
<i>umo2</i>	<i>delta1</i>	0,000001	0,004741	0,000233
<i>umo3</i>	<i>delta2</i>	-0,000002	0,005520	-0,000347
<i>niokr9</i>	<i>delta12</i>	-0,000001	0,999974	-0,000001
<i>niokr11</i>	<i>delta14</i>	-0,000001	0,999982	-0,000001
<i>niokr12</i>	<i>delta15</i>	-0,000002	0,999927	-0,000002
<i>niokr13</i>	<i>delta16</i>	-0,000001	0,999950	-0,000001
<i>niokr14</i>	<i>delta17</i>	0,000000	0,999979	0,000000
<i>niokr33</i>	<i>delta21</i>	0,000000	0,999981	0,000000
<i>niokr34</i>	<i>delta22</i>	-0,000002	0,999955	-0,000002
<i>niokr35</i>	<i>delta23</i>	-0,000002	0,999935	-0,000002
<i>niokr46</i>	<i>delta32</i>	0,000001	0,999989	0,000001
<i>niokr47</i>	<i>delta33</i>	0,000002	0,999916	0,000002
<i>niokr48</i>	<i>delta34</i>	0,000000	0,999999	0,000000
<i>niokr49</i>	<i>delta35</i>	-0,000001	0,999977	-0,000001
<i>umo11</i>	<i>delta37</i>	-0,000001	0,005735	-0,000103

трех значений в рамках оценки социальной эффективности для направления «научная работа»:

umo8: авторских листов всего;

niokr8: объем печатных листов монографий научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР);

niokr44: общее количество защищенных проектов НИОКР.

Оценка социальной эффективности деятельности для направления «научная работа» ($E_{соц\ НР}$) при измерении управляемых параметров, согласно формуле (2):

$$E_{соц\ НР} = 0,97025858E+00.$$

Модель граничной функции:

$$\ln Y_i = -0,132 \cdot 10^3 + 0,3534 \cdot 10^2 \cdot \ln x_{i1} + 0,1168 \cdot 10^2 \cdot \ln x_{i2} + v_{it}.$$

Функция неэффективности:

$$\mu_i = -0,2964 + (-0,24757 \cdot z_{i1} - 0,696 \cdot 10^{-1} \cdot z_{i2} + 0,205 \cdot z_{i3}) \cdot 10^{-3}.$$

В результате расчетов оценки эффективности деятельности направления «научная работа»:

$E_{соц\ НР}$ — оценка социальной эффективности = 0,97025858;

$E_{бюдж\ НР}$ — оценка бюджетной эффективности = 0,99556893;

$E_{комм\ НР}$ — оценка коммерческой эффективности = 0,9454772.

Средняя арифметическая оценка эффективности деятельности направления «научная работа» ($\bar{E}_{до\ НР}$) по отношению к достижимому потенциалу в случае наблюдения наиболее значимых параметров, вычисленная согласно выражению (1) при условии, что вес соответствующего показателя в системе оценок равнозначен, $\omega_{бюдж} = \omega_{соц} = \omega_{комм} = \omega$,

$$\bar{E}_{до\ НР} = \frac{(0,99557 + 0,97026 + 0,94548)}{3} = 0,97.$$

Оценка параметров α , β , μ , δ_v^2 , δ_u^2 выполнена методом максимального правдоподобия, реализованным в программе FRONTIER 4.1 [13, 14]. Пример представления результатов статистик оценки социальной эффективности ($E_{соц\ НР}$) приведен в табл. 2.

Таблица 2 — Значения оцениваемых параметров и их статистики: оценка социальной эффективности ($E_{соцНП}$)

Параметр	Оценка	t-статистика
α	-0,13243482E+03	-0,14312826E+03
β_1	0,35342317E+02	0,86545587E+02
β_2	0,11685119E+02	0,56243095E+02
δ_0	-0,29638897E+00	-0,29864386E+01
δ_1	-0,24757826E-03	-0,82825777E+01
δ_2	-0,69638747E-04	-0,66842763E+01
δ_3	0,20506635E-03	0,42222152E+01
σ^2	0,67610030E-05	0,95056012E+00
γ	0,99999999999	
llf	0,19278785E+02	

$\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ — полная дисперсия, включающая дисперсию «белого шума» и дисперсию неэффективности;

$\gamma = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$ — доля дисперсии, объясняющей неэффектив-

ность, в полной дисперсии;

llf — логарифмированное значение функции максимального правдоподобия.

В качестве оценки технической эффективности в формуле (3) использована экспонента моды условного распределения неэффективной составляющей [15]

$$TE_i = \begin{cases} \exp(-M(u_i | \varepsilon_i)) = \exp(-\tilde{\mu}_i) = \exp(-\hat{\mu}_i), & \tilde{\mu}_i \geq 0 \\ 1, & \tilde{\mu}_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Далее сделано предположение о том, что все факторы в функции неэффективности для направления «научная работа» управляемы. Например, найден способ мотивации, в результате чего объем печатных листов может возрасти. Это означает, что фиктивная переменная в функции неэффективности для всех эмпирических наблюдений получит значение, равное 1. Используя вычисления, предложенные в работе [15], оценка технической эффективности произ-

водства по отношению к достижимому потенциалу $TE_{НП} = 0,98298337$.

Наиболее интересными в ходе исследования представляется интерпретация коэффициентов функции неэффективности. Например, в модели параметр «авторских листов всего» имеет отрицательный коэффициент (-0,24757), что означает: чем больше авторских листов выпускается в учебно-методическом отделе, тем меньше выпускается статей (в печатных листах). Это подтверждает достоверность и доказательность представленной оценки, равно как позволяет контролировать вероятность ошибки исследования в случае получения неадекватной логики зависимостей.

В исследовании также присутствовала нулевая гипотеза о том, что эффекты неэффективности не имеют стохастической природы или не зависят от переменных и периодов наблюдений. Но она была отклонена в ходе исследования. Оценка параметра γ близка к 1, это означает, что эффекты функции неэффективности имеют высокую значимость в анализе результативности при построении оценки социальной эффективности.

Значимым результатом исследования [2 — 5] является формализованное представление оценки эффективности деятельности организации. Важное условие практической реализации поставленной задачи — учет существующего набора управляющих параметров, так как они являются привычными для анализа и использования ЛПР в организации. В работе на эмпирическом материале сконструирована функция, описывающая границу производственных возможностей группы докторов и кандидатов наук институтов в рамках примера построения оценки для направления «научная работа». Разделение факторов неэффективности на управляемые и неуправляемые позволило компенсировать недостаток подхода — отсутствие возможности управления производственным процессом. Построенная в рамках описанного исследования управляемая граница производственных возможностей и функция неэффективности дали возможность оценить степень воздействия факторов неэффективности на результаты труда.

Литература

1. Филиппов В.М. Управление в высшей школе: опыт, тенденции, перспективы : 2-е изд. М. : Логос, 2006. 488 с.
2. Рудникова М.А., Ручкин В.Б. Оценка эффективности управления социально-экономическими системами транспортного комплекса : учебное пособие. М. : МИИТ, 2010. 86 с.
3. Рудникова М.А., Ручкин В.Б. Университетский комплекс: параметры оценки // Мир транспорта. 2010. № 4. С. 88 — 93.
4. Рудникова М.А. Технология оценки эффективности управления транспортными комплексами (на примере Московского государственного университета путей сообщения) // Менеджмент транспортно-коммуникационного комплекса: ключевые проблемы и пути их решения : материалы междунар. науч.-практ. конф., 15 — 16 октября 2008 г. Алматы : АО «КазАТК им. М. Тынышпаева», 2008. С. 167 — 171.
5. Рудникова М.А. Формализованное представление оценки эффективности управления социально-экономическими системами // Системный анализ. Информатика. Управление (САИУ-2011) : тезисы докладов II Всеукраинской науч.-практ. конф., 10 — 11 марта 2011 г. Запорожье : КПУ, 2011. С. 188 — 189.
6. Об утверждении показателей деятельности и критериев государственной аккредитации высших учебных заведений : приказ Рособнадзора № 1938 от 30.09.05.
7. Международные подходы к ранжированию вузов и специальностей. АНО НРА «РейтОР», 2009. 78 с.
8. Левин Б.А. Университет путей сообщения: императивы развития : краткий отчет о деятельности Московского государственного университета путей сообщения за 1997 — 2001 гг. М. : МИИТ, 2002. 257 с.
9. Kumbhakar S., Lien G., Hardaker J.B. Technical efficiency in competing panel data models: a study of Norwegian grain farming. Springer Science + Business Media, LLC, 2012.
10. Kokkinou A. Estimating technical inefficiency: an empirical approach to EU industries // Regional Science Inquiry Journal. 2010. Vol. II (2). p. 95 — 104.
11. Aigner D.J., Lovell C.A.K., Schmidt P. Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models // Journal of Econometrics. 1977. № 6. P. 21 — 37.
12. Battese G.E., Coelli T.J. Prediction of Firm-level Technical Efficiencies with a Generalized Frontier Production Function and Panel Data // Journal of Econometrics. 1988. Vol. 38. P. 387 — 399.
13. Афанасьев М.Ю. Модель производственного потенциала с управляемыми факторами неэффективности // Прикладная эконометрика. 2006. № 4. С. 74 — 89.
14. Battese G.E., Coelli T.J. A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data // Empirical Economics. 1995. V. 20. P. 325 — 332.
15. Айвазян С.А., Афанасьев М.Ю. Оценка мероприятий, направленных на управление факторами неэффективности производства // Прикладная эконометрика. 2007. № 4. Т. 8.

References

1. Filippov V.M. Upravlenie v vysshej shkole: opyt, tendentsii, perspektivy. [Management in a higher educational institution: experience, tendencies, perspectives] 2-e izd. M.:Logos, 2006. 488s.
2. Rudnikova M.A., Ruchkin V.B. Otsenka effektivnosti upravleniya socialno-ekonomicheskimi sistemami transportnogo kompleksa [Effectiveness estimation of transport complex socio-economic systems]: Uchebnoe posobie. M.: MIIT, 2010. 86 s.
3. Rudnikova M.A., Ruchkin V.B. Universitetskij kompleks: parametry otsenki [University complex: estimation parameters] // Mir transporta. 2010. № 4. S. 88 — 93.
4. Rudnikova M.A. Tekhnologiya otsenki effektivnosti upravleniya transportnymi kompleksami [Effectiveness estimation technology of transport complex management] (na primere Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya) //Menedzhment transportno-kommunikacionnogo kompleksa: ključevye problemy i puti ih resheniya : materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., (15-16 okt., 2008 g.). Almaty: AO«KazATK im. M. Tynyshpaeva», 2008. S. 167 — 171.
5. Rudnikova M.A. Formalizovannoe predstavlenie otsenki effektivnosti upravleniya socialno-ekonomicheskimi sistemami [Formalized view of effectiveness estimation of socio-economic systems management] // Sistemnyj analiz. Informatika. Upravlenie (SAIU-2011): tezisy dokladov II Vseukrainskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Zaporozh'e, 10-11 marta 2011 g.) Zaporozh'e: KPU, 2011. S. 188 — 189.
6. Ob utverzhdenii pokazatelej dejatel'nosti i kriteriev gosudarstvennoj akkreditatsii vysshikh uchebnykh zavedenij [On confirmation of activity indexes and criteria of educational institutions state accreditation]: Prikaz Rosobrnadzora № 1938 ot 30.09.
7. Mezhdunarodnye podkhody k ranzhirovaniyu vuzov i spetsialnostej [International approaches to Universities and specialties' rating] . ANO NRA «RejtOR», 2009. 78 s.
8. Ljovin B.A. Universitet putej soobshheniya: imperativy razvitiya: kratkij otchet o dejatel'nosti Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya za 1997— 2001 [University of railway transport: development imperatives: short report on activity of Moscow State University of Railway Transport for 1997 — 2001]. M.: MIIT, 2002. 257 s.
9. Subal C. Kumbhakar, Gudbrand Lien, J. Brian Hardaker. Technical efficiency in competing panel data models: a study of Norwegian grain farming. Springer Science+Business Media, LLC 2012.
10. Aikaterini Kokkinou. Estimating technical inefficiency: an empirical approach to EU industries // Regional Science Inquiry Journal. 2010. Vol. II (2). PP 95—104.
11. Aigner D.J., Lovell C.A.K., Schmidt P. Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models // Journal of Econometrics. 1977. № 6. R.R. 21—37.
12. Battese G.E., Coelli T.J. Prediction of Firm-level Technical Efficiencies with a Generalized Frontier Production Function and Panel Data // Journal of Econometrics. 1988. Vol. 38. R.R. 387—399.
13. Afanasjev M. Ju-Model proizvodstvennogo potentsiala s upravljajemyimi faktorami neeffektivnosti. [U-model of the production potential with controlled inefficiency factors] // Prikladnaja ekonometrika. 2006. № 4. S. 74—89.
14. Battese G.E., Coelli T.J. A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data // Empirical Economics. 1995. V. 20. P. 325—332.
15. Ajvazjan S.A., Afanasjev M.Ju. Otsenka meroprijatij, napravlennykh na upravlenie faktorami neeffektivnosti proizvodstva // Prikladnaja ekonometrika. [Estimating events, aimed at managing production inefficiency factors] 2007. № 4. Т. 8.

УДК 681.518.5+656.259.9

Дмитрий Викторович Ефанов, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), инженер ЗАО «МГП «ИМСАТ», **Николай Александрович Богданов**, ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), инженер Института по проектированию сигнализации, централизации, связи и радио на железнодорожном транспорте «Гипротранссигнализация»

МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ТОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Dmitry V. Efanov, PhD in Engineering, Assistant of «Automation and Remote control at Railways» Chair, St. Petersburg State Transport University (PSTU), engineer of CJSC «MGP IMSAT», **Nikolai A. Bogdanov**, Assistant of «Automation and Remote control at Railways» Chair, St. Petersburg State Transport University (PSTU), engineer of Railway Signaling, Centralization, Communications and Radio Design Institute «Giprotranssignalsvyaz»

Monitoring Of Audio Frequency Track Circuit Parameters

Аннотация

Статья посвящена вопросам повышения надежности функционирования наиболее уязвимых средств железнодорожной автоматики — рельсовых цепей — за счет мониторинга их технического состояния. Рассмотрены современные рельсовые цепи тональной частоты. Описаны особенности подключения аппаратуры съема диагностических данных к элементам тональных рельсовых цепей, а также принципы автоматизированной обработки получаемой информации. Приведен каталог неисправностей тональных рельсовых цепей, позволяющий определить по совокупности графических данных тип возникшего дефекта. На основании каталога неисправностей с учетом возможностей систем технического диагностирования и мониторинга дан пример алгоритмизации процесса диагностирования рельсовых цепей тональной частоты.

Ключевые слова: техническая диагностика, железнодорожная автоматика и телемеханика, рельсовые цепи тональной частоты, отказ, предотказное состояние, мониторинг состояния.

Abstract

This article is dedicated to improvement of reliability of the most vulnerable railway automation means - track circuits - using technical condition monitoring. Modern audio frequency track circuits are analyzed. Specifics of connection of diagnostic instrumentation to the audio frequency track circuit elements and the principles of automated processing of obtained data are described. A list of audio frequency track circuit faults is provided, which allows determining the type of defect by aggregated graphic data. Based on the faults catalog and with account to possibilities of technical diagnostics and monitoring system the example of algorithmic presentation of audio frequency track circuit diagnosis process is provided.

Keywords: technical diagnostics, railway automation and remote control, audio frequency track circuits, failure, near-failure state, condition monitoring.

Введение

Важной составляющей работы систем автоматического управления ответственными технологическими процессами, к которым относится и перевозочный процесс на железнодорожном транспорте, является поддержание высокого уровня надежности функционирования всех узлов [1]. С этой целью современные системы обеспечения движения поездов, в том числе средства железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), снабжаются развитыми средствами диагностирования — это средства и интегрированного контроля (самодиагностирование), и внешнего.

Техническое диагностирование сегодня благодаря возможностям микропроцессорной техники может проводиться непрерывно во времени. При этом результат измерений может быть автоматически оценен, что позволит определить текущее состояние контролируемого объекта. На железных дорогах России ввиду доминантного положения релейной техники, исключающей самодиагностирование, с конца XX в. внедряются системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) [2]. Их работа позволяет повысить качество функционирования средств автоматики за счет своевременного определения так называемых предотказных состояний [3]. Дальнейшее вмешательство технического персонала зачастую позволяет предотвратить потенциальный отказ.

Для своевременной обработки диагностической информации, помощи техническому персоналу дистанций сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) с 2007 г. создаются центры технического диагностирования и мониторинга [4]. Первый такой центр был организован на Октябрьской ж. д. В первые годы его эксплуатации удалось снизить количество отказов на магистрали Санкт-Петербург — Москва более чем в 2 раза (рис. 1) [5].

Сегодня расширяются возможности СТДМ по съему информации, анализу получаемых данных и постановке диагноза техническому объекту. Особое внимание уделяется напольным объектам ЖАТ: стрелочным электроприводам и рельсовым цепям, на которые приходится свыше половины всех отказов средств СЦБ. Данная работа посвящена вопросам технического диагностиро-

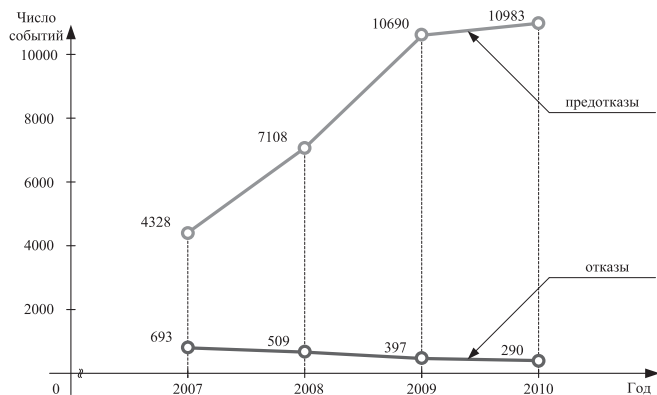


Рисунок 1 — Статистика отказов и предотказов устройств автоматики на линии Санкт-Петербург — Москва

вания и мониторинга параметров рельсовых цепей тональной частоты (ТРЦ) средствами Аппаратно-программного комплекса диспетчерского контроля (АПК-ДК), разработанного на кафедре «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения.

1. Особенности организации контроля тональных рельсовых цепей

ТРЦ работают на несущих частотах 420, 480, 580, 720, 780 Гц, модулируемых частотами 8 или 12 Гц. Практически вся аппаратура ТРЦ располагается на посту электрической централизации либо в транспортабельном модуле (исключение составляют путевые трансформаторы, выравниватели и резисторы, через которые подключается постовая аппаратура непосредственно к рельсам, — они располагаются в путевых ящиках). В постовой аппаратуре ТРЦ выделяются путевые генераторы (ПГ), путевые фильтры (ПФ), путевые приемники (ПП) и путевые реле (ПР). К питающему концу ТРЦ через ПФ подключается ПГ. Генератор питается переменным током частотой 50 Гц и напряжением 35 В. Он настраивается на одну из пяти несущих частот, требуемых для работы ТРЦ. На приемном (релейном) конце ТРЦ расположены ПП и ПР. При отсутствии подвижного состава ПП, настроенный на соответствующую частоту, находится во включенном состоянии. Соответственно ПР находится под током и, таким образом, передает информацию о свободности контролируемого участка. При шунтировании ТРЦ колесной парой либо при повреждении в рельсовой линии ТРЦ ПП и ПР выключаются. ТРЦ в этом случае считается занятой. ПП питается током 50 Гц и напряжением 17,5 В. Особенности работы ТРЦ во всех необходимых режимах, принципы расчета параметров аппаратуры и особенности технической реализации изложены в [6, 7].

С целью организации мониторинга технического состояния ТРЦ основные рабочие параметры их аппаратуры контролируются с применением специализированных контроллеров съема диагностической информации. Это либо устройства контроля тональных рельсовых цепей (УК-ТРЦ) различных модификаций, либо адаптер диагностирования тональных рельсовых цепей (АД-ТРЦ) [8, 9].

На рис. 2 изображена схема подключения контроллеров УК-ТРЦ к объекту диагностирования.

УК-ТРЦ подключается параллельно к ПР, ПП и ПГ. При этом по условиям соблюдения безопасности с целью исключения

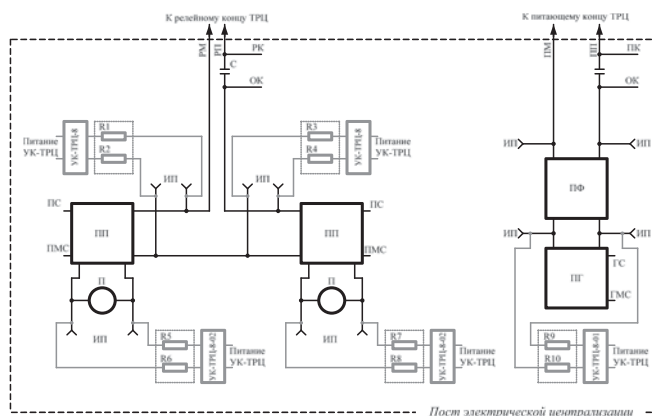


Рисунок 2 — Схема подключения контроллера диагностирования ТРЦ

опасного влияния УК-ТРЦ на схему рельсовой цепи подключение производится через блоки защитных резисторов R1 — R2, R3 — R4, ..., R9 — R10. Каждый резистор имеет сопротивление 6,81 кОм, позволяющее исключить любое влияние аппаратуры диагностирования на саму ТРЦ.

Каждый прибор УК-ТРЦ имеет восемь каналов съема аналоговой информации и позволяет измерять значения напряжений с периодом опроса 8 — 12 с. Если применяется контроллер УК-ТРЦ-8, то для подключения к разным узлам ТРЦ используется различная его модификация. Устройство УК-ТРЦ-8 подключается параллельно ПП и позволяет снимать переменное напряжение в диапазоне 0 — 2 В. УК-ТРЦ-8-01 подключается к ПГ и способно измерять напряжение в диапазоне 0 — 12 В. УК-ТРЦ-8-02 действует аналогично описанной выше модификации контроллера, снимая данные с ПР.

Контроллеры УК-ТРЦ-М и АД-ТРЦ универсальны и могут подключаться к любому из обозначенных выше узлов. Среди преимуществ — повышенная скорость измерения (2 — 5 с), высокая помехоустойчивость и развитые функции самодиагностирования приборов [9].

Диагностические данные (результаты измерений напряжений) передаются по интерфейсу связи RS-485 на плату ввода-вывода данных в концентраторе линейного поста. По данным выборок в режиме реального времени программным обеспечением системы АПК-ДК строятся графики изменения напряжений для всех узлов съема диагностической информации каждой ТРЦ. Горизонтальная ось соответствует времени в часах (минутах), вертикальная — напряжению в вольтах. При этом с целью анализа качества работы ТРЦ в технологическом окне автоматизированного рабочего места технолога графики можно просматривать как по отдельности (рис. 3а, б, в), так и совместно (рис. 4).

Анализируя графики напряжений во всех узлах съема данных для рассматриваемой ТРЦ, технолог дистанции СЦБ или центра мониторинга определяет техническое состояние диагностируемого объекта. Например, обратим внимание на рис. 3 или 4. Здесь приведены графики изменения напряжений ТРЦ на станции Бушевец Октябрьской ж.д. с 13:00 до 16:00 02.11.07. В 14:42 происходит небольшой скачок напряжения ПГ (см. рис. 3а), напряжение остается на достигнутом уровне. В этот же момент напряжение ПП падает и также остается на достигнутом уровне. ПР находится под током. ТРЦ свободна. Данная ситуация не является нормальной, так как в любой

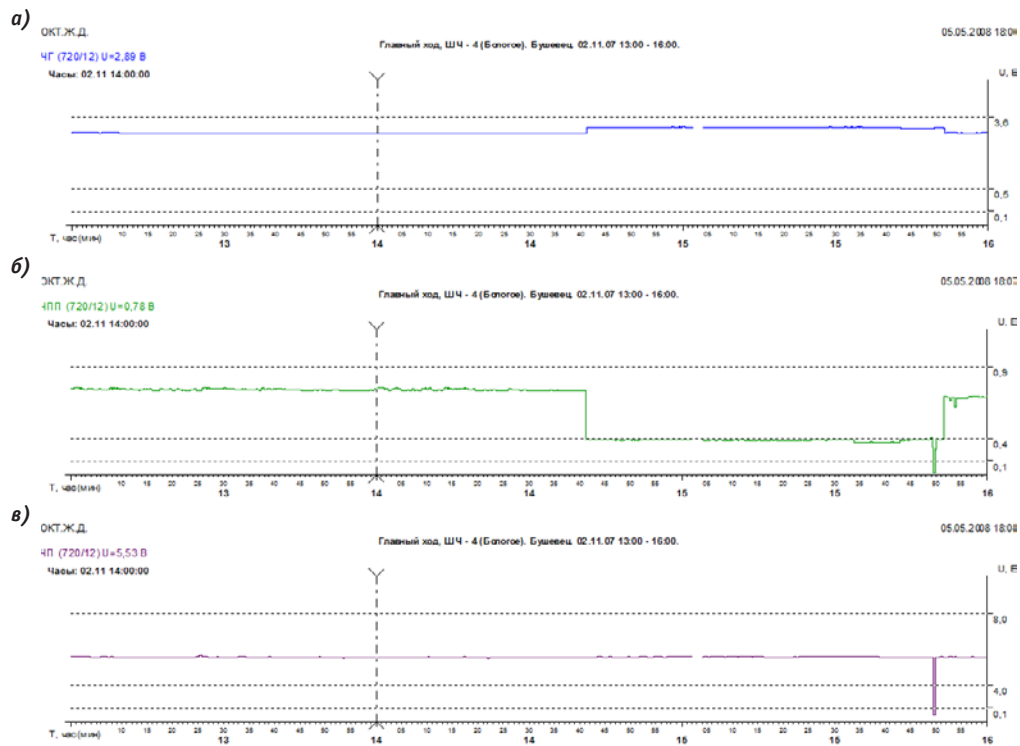


Рисунок 3 — Графики изменения напряжений путевого генератора (а), путевого приемника (б) и путевого реле (в)

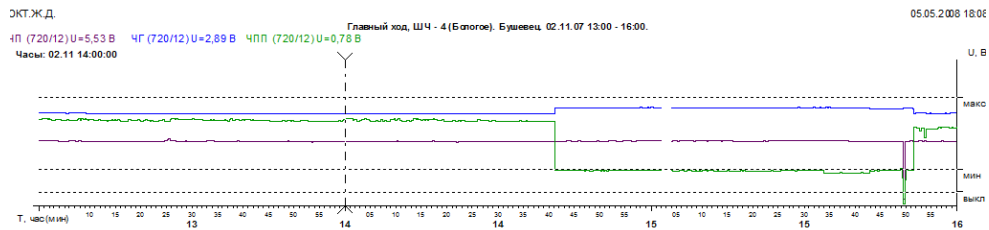


Рисунок 4 — Совмещенные графики изменения напряжений

момент времени начиная с 14:42 ПР может выключиться, что приведет к возникновению ложной занятости рельсовой цепи.

Рассматривая совокупность графиков, технолог дистанции СЦБ или центра мониторинга может зафиксировать предостказную ситуацию, связанную с падением напряжения на входе ПП, а также выработать рекомендации для технического персонала по поддержанию качества функционирования средств СЦБ.

2. Каталог неисправностей тональных рельсовых цепей

В 2008 — 2010 гг. в отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Автоматизация технического обслуживания» нашей кафедры авторами данной статьи с привлечением специалиста в области рельсовых цепей Б.Н. Елкина (1936 — 2010) была проведена работа по анализу графиков ТРЦ. Ее целью было создание пособия по принятию решений техническим персоналом [10], а позднее и системы поддержки принятия решений (СППР), интегрированной в комплекс задач «Мониторинг» — автоматизированное рабочее место технолога в системе технического диагностирования и мониторинга АПК-ДК.

В результате работы были выявлены закономерности и отличительные особенности измеряемых контроллерами АПК-ДК характеристик ТРЦ, соответствующих различным видам предостказов (табл. 1) и отказов (табл. 2) аппаратуры ТРЦ. Все события, внесенные в перечень каталогов, фиксируются с применением автоматических средств технического диагностирования и мониторинга.

3. Автоматизация выявления отказов и предостказных состояний тональных рельсовых цепей

В [11] приводится метод кодирования состояний диагностируемых объектов, базирующийся на анализе во времени значений сигналов телеконтроля и телеизмерения от логически связанных действующих устройств СЦБ. Авторами данной статьи разработана логико-временная модель, учитывающая соотношения между напряжениями в разных точках подключения контроллера съема диагностической информации в ТРЦ. На основе данной модели, анонсированной в [12], составлена группа алгоритмов, позволяющая автоматизировать процесс мониторинга технического состояния ТРЦ.



Таблица 1 — Каталог предтоказов аппаратуры тональных рельсовых цепей

№	График	Событие	Комментарии
1		Предтоказ ПГ	При предтоказном состоянии ПГ на его входе будет наблюдаться медленное падение напряжения, при этом также будет наблюдаться падение напряжения на входе ПП. Возможно пульсирование параметров напряжения между верхним и нижним пределами
2		Предтоказ ПП	При анализе нарушений в работе ПП наблюдаются следующие отличительные особенности в графиках напряжения. 1. Напряжение на выходе ПГ остается без изменений. 2. Напряжение на входе ПП пульсирует в пределах нижней и верхней норм. 3. Напряжение на выходе ПП практически не изменяется. Если анализируется разветвленная ТРЦ, то при нарушении работы одного из приемников отщепления на других приемниках может наблюдаться небольшое увеличение напряжения
3		Предтоказ ПФ	При предтоказном состоянии ПФ происходит увеличение напряжения на выходе ПГ примерно на 5 — 10%. При этом напряжение на входе приемника может снизиться до минимального значения
4		Вероятно, предтоказ напольных устройств ТРЦ	Возможные предтоказные состояния в напольных устройствах: — переходные сопротивления в тростовых и стыковых соединениях; — переходные сопротивления в путевых коробках и дросселях; — короткие замыкания в рельсовых цепях. При данных предтоказах происходит уменьшение напряжения на входе ПП с пульсированием в пределах нормы. Для локализации дефекта можно использовать измеренные значения напряжений на ПП всех ответвлений ТРЦ

Таблица 2 — Каталог отказов аппаратуры тональных рельсовых цепей

№	График	Событие	Комментарии
1	<p>ОКТ Ж.Д. Главный код, ШЧ - 2 (Белогор). Состояние: 01.11.07 13:00 - 16:00. H112П (72012) U=4.72 В H112П (72012) U=1.82 В H112П (72012) U=0.55 В Часы: 01.11.14:00:00</p>	Отказ ПГ	При отказе ПГ происходит резкое падение напряжения на выходе генератора. На входе и выходе ПП напряжение падает ниже нормы
2	<p>ОКТ Ж.Д. Главный код, ШЧ - 4 (Белогор). Выходной источник: 15.12.07 17:00 - 20:00. 4454П (72012) U=1.17 В 4454П (72012) U=5.93 В 4454П (72012) U=0.53 В Часы: 15.12.18:00:00</p>	Отказ ПП	При отказе ПП наблюдается резкое снижение напряжения на его выходе, при этом графики напряжений на входе ПП и выходе ПГ остаются практически неизменными. По этим особенностям можно сделать вывод о том, что с выхода ПП напряжение не поступает на ПР, а на входе ПП напряжение присутствует и находится в норме
3	<p>ОКТ Ж.Д. Главный код, ШЧ - 4 (Белогор). Браннык: 02.11.07 13:00 - 16:00. 4П (72012) U=5.53 В 4П (72012) U=2.89 В 4П (72012) U=0.78 В Часы: 02.11.14:00:00</p>	Отказ ПФ	При отказе ПФ на выходе ПГ будет наблюдаться небольшое увеличение напряжения, а на входе и выходе ПП падение напряжения ниже нормы
4	<p>ОКТ Ж.Д. Главный код, ШЧ - 5 (Гурово). Малая Платформа: 05.11.07 21:00 - 04.11.08:00. 2385СП (58012) U=4.43 В 2385СП (58012) U=4.38 В 2385СП (58012) U=0.77 В 2385СП (58012) U=0.89 В 2385СП (58012) U=0.58 В 2385СП (58012) U=0.52 В 2385СП (58012) U=0.51 В Часы: 05.11.22:00:00</p>	Отказ напольных устройств ТРЦ	Возможные отказы состояния в напольных устройствах: — переходные сопротивления и обрывы в тросовых и стыковых соединителях; — переходные сопротивления и обрывы в путевых коробках и дросселях; — короткие замыкания в ТРЦ. При отказе возможно падение напряжения на входе и выходе приемника на уровень ниже нормы. Напряжение на ПГ практически не меняется. Для локализации дефекта можно использовать измеренные значения напряжений на ПП всех ответвлений ТРЦ
5	<p>ОКТ Ж.Д. Главный код, ШЧ - 4 (Белогор). Остатки - Спираль: 03.01.08 00:00 - 03:00. H28П (72012) U=5.68 В H28П (72012) U=1.36 В H28П (72012) U=2.42 В Часы: 03.01.01:00:00</p>	Излом рельса	После анализа графиков напряжений ТРЦ, в которых был обнаружен излом рельса, выявлены следующие отличительные особенности. 1. На выходе ПГ ТРЦ, на которой произошел излом, напряжение не изменяется. 2. На входе ПП ТРЦ, где произошел излом, напряжение падает ниже минимального значения и наблюдается слабая пульсация (чем ближе излом к питающему концу рельсовой цепи, тем выше амплитуда и частота пульсации). 3. На выходе ПП напряжение до нулевого значения не падает. Если у рассматриваемой рельсовой цепи есть смежная ТРЦ, которая питается от того же генератора, то на ней наблюдаются следующие проявления. 1. На выходе ПГ небольшой подъем напряжения на 5 — 10%. 2. На входе ПП происходит подъем напряжения примерно на 5 — 10%
6	<p>ОКТ Ж.Д. СГБ - Кофта, ШЧ - 8 (Гурово). Бабинец: 28.02.08 10:00 - 13:00. 36A8П (42012) U=5.53 В 36A8П (42012) U=0.75 В 36A8П (42012) U=1.41 В Часы: 28.02.11:00:00</p>	Вероятно, перемежающийся отказ напольных устройств	Возможные перемежающиеся отказы в напольных устройствах: — короткое замыкание ИС; — переходные сопротивления и обрывы в тросовых и стыковых соединителях; — переходные сопротивления и обрывы в путевых коробках и дросселях; — короткие замыкания в ТРЦ. При перемежающемся отказе возможно падение напряжения на входе приемника на уровень ниже нормы и его пульсирование от максимального значения и ниже минимального. При этом напряжение на выходе приемника стремится к нулю. Для локализации дефекта можно использовать данные: 1. Напряжений ПП на всех ответвлениях. 2. При коротком замыкании ИС — параметры смежных ТРЦ

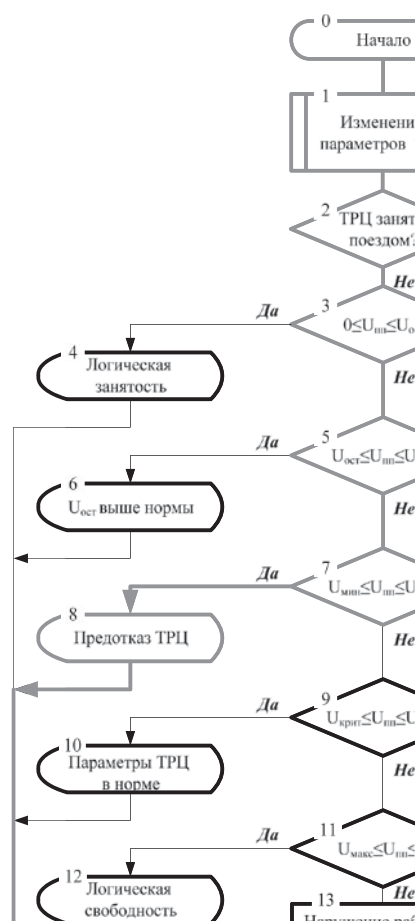


Рисунок 5 — Алгоритм автоматизации диагностирования ПП TRЦ

Все алгоритмы функционируют непрерывно в режиме реального времени в составе программного обеспечения СППР, т. е. являются циклическими. На рис. 5 в качестве примера приведен фрагмент алгоритма определения технического состояния TRЦ. Красным цветом показан путь фиксации предотказного состояния TRЦ. СППР позволяет с некоторой вероятностью определять принадлежность состояния рельсовой цепи некоторому классу диагностических ситуаций.

Рассмотрим работу алгоритма выявления диагностической ситуации, приведенной на графиках рис. 3. Для правильной работы алгоритма необходимо, чтобы напряжение на ПГ было не выше верхней границы, а напряжение на входе ПП не ниже U_{\min} и не выше U_{\max} . Такое условие необходимо ввиду того, что напряжение на ПП напрямую зависит от изменения напряжения на ПГ. Положим, что данное условие выполняется и $U_{\text{пг}}$ соответствует установленной норме для рассматриваемой TRЦ (логический оператор <1>). В логическом операторе <2> проверяется условие свободы TRЦ от подвижных единиц, а также отсутствие наложения испытательного шунта или отсутствие попадания напряжения на входы ПП от ПГ.

Обращаясь к рис. 3, видим, что в 14:42 контролируемая TRЦ была свободна и исправна. В обозначенное время на путевом входе ПП TRЦ происходит резкое падение напряжения до U_{\min} , а на выходе ПГ наблюдается небольшое увеличение напряжения, при этом $U_{\text{пг}}$ находится в допустимых пределах. В сложившейся

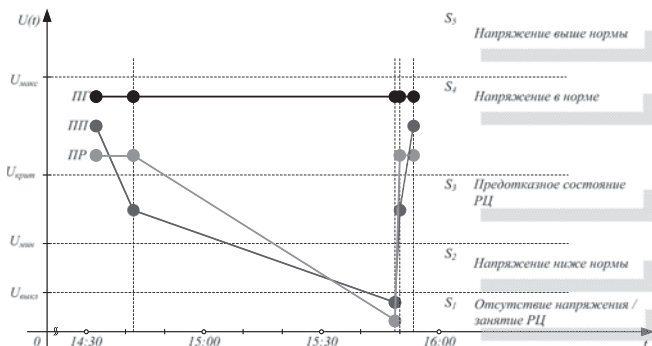


Рисунок 6 — Зонная модель распределения границ напряжений аппаратуры TRЦ

ситуации напряжение находится в границах от $U_{\min} \leq U_{\text{пг}} \leq U_{\text{крит}}$, и алгоритм переходит к выполнению условия <7>. Оператором <7> проверяется нахождение в зоне от U_{\min} до $U_{\text{крит}}$ напряжения ПП в TRЦ, это соответствует предотказному состоянию устройства, происходит фиксация предотказа и передача его в базу данных СППР (оператор <14>). В базе данных СППР зафиксированный предотказ классифицируется (т. е. соотносится с группой идентичных предотказов). Затем вырабатываются рекомендации по поиску и устранению возникшего дефекта TRЦ.

Как видно из рис. 5, алгоритм основан на позонном делении напряжения ПП на промежутке $U_{\text{пг}} > 0$. Каждой зоне напряжения соответствует своя диагностическая ситуация, проявляющаяся во времени вследствие изменений сигналов телеизмерения (рядом с соответствующими блоками условий на рис. 5 приведены состояния ПП S_i — S_5). На рис. 6 показано деление напряжения на зоны для реальной TRЦ и фиксация ситуации «Предотказ TRЦ».

Заключение

Настоящая работа посвящена изложению результатов исследования в области технического диагностирования и мониторинга состояния TRЦ. Сформированные каталоги неисправностей, включающие в себя совокупности графиков изменения напряжений, полученные с контрольных точек TRЦ, позволяют техническому персоналу дистанций СЦБ более оперативно реагировать на возникающие дефекты в аппаратуре рельсовых цепей.

Дальнейшая алгоритмизация процесса диагностирования позволит расширить функциональные возможности современных систем технического диагностирования и мониторинга, сделав их не только средством автоматизации технического обслуживания устройств СЦБ и визуализации поездной обстановки на дороге, но и комплексом поддержки принимаемых решений.

Отметим, что с целью развития технологии мониторинга TRЦ можно подключить измерительные контроллеры АПК-ДК к путевому фильтру (ПФ), что увеличит глубину диагностирования и позволит сузить зону поиска дефектов в напольных устройствах TRЦ. Кроме того, при диагностировании можно также использовать измеренное опытным путем значение напряжения при наложении испытательного шунта с сопротивлением 0,06 Ом, что позволит фиксировать такие ситуации, как плохая шунтовая чувствительность у подвижных единиц и плохое техническое состояние поверхности катания рельсов.

Литература

1. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики : учебник для вузов ж. д. транспорта / Брылеев А.М., Переборов А.С., Сапожников Вл.В., Смирнова А.В., Эйлер А.А.; изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Транспорт, 1977. 376 с.
2. Ефанов Д.В., Плеханов П.А. Обеспечение безопасности движения за счет технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт Урала. 2011. № 3. С. 44 — 48.
3. Сапожников Вл. В., Лыков А.А., Ефанов Д.В. Понятие предотказного состояния // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 12. С. 6 — 8.
4. Шабалин А.Н., Насонов Г.Ф., Капуста П.А. Центр технической диагностики и мониторинга на Октябрьской дороге // Автоматика, связь, информатика. 2007. № 5. С. 23 — 25.
5. Шабалин А.Н. Результаты использования и перспективы развития передовых технологий обслуживания устройств ЖАТ // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : сборник докладов пятой междунар. науч.-практ. конф. «ТрансЖАТ-2010». Ростов-на-Дону, 2010. С. 81 — 89.
6. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В.С. Аркатов, Ю.В. Аркатов, С.В. Казеев, Ю.В. Ободовский; 3-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во «ООО Миссия-М», 2006. 496 с.
7. Федоров Н.Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями : учебное пособие. Самара : СамГАПС, 2004. 132 с.
8. Молодцов В.П., Иванов А.А. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учебное пособие. СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. 140 с.
9. Каталог продукции ЗАО «МГП «ИМСАТ»: Средства технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / ЗАО «МГП «ИМСАТ», 2012. 19 с.
10. Богданов Н.А. Автоматизация поиска неисправностей в рельсовых цепях тональной частоты // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : сборник докладов пятой междунар. науч.-практ. конф. «ТрансЖАТ-2010». Ростов-на-Дону, 2010. С. 135 — 140.
11. Ефанов Д.В. О методе выявления логических ситуаций в системах технической диагностики и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2010. № 4. С. 66 — 71.
12. Ефанов Д.В., Богданов Н.А. О достоверности фиксации предотказных состояний в системах непрерывного контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 2. С. 27 — 30.

References

1. Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Theoretical fundamentals of railway automation and remote control]: textbook for rail transport universities/ Bryleev A.M., Pereborov A.S., Sapozhnikov V.L., Smirnova A.V., Eyler A.A. // 2nd edition, revised and extended. M.: Transport, 1977. 376 p.
2. Efanov D.V., Plekhanov P.A. Obespechenie bezopasnosti dvizheniya za schet tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Ensuring traffic safety through technical diagnostic and monitoring of railway automation and remote control hardware] // Transport of the Urals. 2011. No. 3. P. 44 — 48.
3. Sapozhnikov V. V., Lykov A.A., Efanov D.V. Ponyatie predotkaznogo sostoyaniya [Concept of pre-failure state] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2011. No.12. P. 6 — 8.
4. Shabalin A.N., Nasonov F., Kapusta P.A. Tsentr tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa na Oktyabrskoy doroge [Technical diagnosis and monitoring center of Oktyabrskaya Railway] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2007. No.5. P. 23 — 25.
5. Shabalin A.N. Rezultaty ispolzovaniya i perspektivy razvitiya pere-dovykh tekhnologiy obsluzhivaniya ustroystv ZHAT [Results of use and prospects for the development of advanced maintenance technologies for railway automatics devices] // Railway automatics and remote control: Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference "TransZhAT-2010." Rostov-on-Don. 2010. P. 81 — 89.
6. Relsovyte tsepi magistralnykh zheleznykh dorog [Track circuits of main railways] : Manual / V.S. Arkatov, Yu.V. Arkatov, S.V. Kazeev, Yu.V. Obodovskiy. 3rd edition, revised and extended. Moskva, Publishing house "OOO Missiya-M", 2006. 496 p.
7. Fedorov N.E. Sovremennyye sistemy avtoblokirovki s tonalnymi relsovymi tsepyami [Modern interlocking systems with audio frequency track circuits]: textbook. Samara: SamGAPS, 2004. 132 p.
8. Molodtsov V.P., Ivanov A.A. Sistemy dispetcherskogo kontrolya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Dispatch control and monitoring system for railway automation and remote control devices]: textbook. St. Petersburg State Transport University 2010. 140 p.
9. Products catalogue of CJSC "MGP "IMSAT": technical diagnostic and monitoring devices for railway automation and remote control devices / CJSC "MGP "IMSAT", 2012. 19 p.
10. Bogdanov, N.A. Avtomatizatsiya poiska neispravnostey v relsovykh tsepyakh tonalnoy chastoty [Automated troubleshooting of audio frequency track circuits] // Railway automatics and remote control: Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference "TransZhAT-2010." Rostov-on-Don. 2010. P. 135-140.
11. Efanov, D.V. O metode vyavleniya logicheskikh situatsiy v sistemakh tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Concerning the method of identifying logical situations in technical diagnostics and monitoring systems for railway automation and remote control devices] // Journal of the Rostov State University of Transport. 2010. No. 4. P. 66-71.
12. Efanov D.V., Bogdanov N.A. O dostovernosti fiksatsii predotkaznykh sostoyaniy v sistemakh nepryernogo kontrolya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Concerning reliability of determining pre-failure state in continuous monitoring systems for railway automation and remote control devices] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2012. No.2. P. 27-30.

УДК 656.259.12 : 621.316.933

Валерий Евгеньевич Митрохин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы передачи информации» ОмГУПС (Омск),
Александр Евгеньевич Гаранин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы обеспечения движения поездов» КРИЖТ— филиала ИрГУПС (Красноярск),
Артем Владимирович Ряполов, аспирант кафедры «Системы передачи информации» ОмГУПС (Омск)

ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Valery E. Mitrokhin, DSc in Engineering, Professor, Head of «Information Transmission Systems» Chair of OmGUPS (Omsk),
Alexander E. Garanin, PhD in Engineering, Associate Professor of «Railway Traffic Support Systems» of KrIZhT - subsidiary of IrGUPS (Krasnoyarsk),
Artem V. Ryapolov, graduate student of «Information Transmission Systems» Chair, OmGUPS (Omsk)

Probability Of Fault-Free Operation Of Track Circuits In Case Of Lightning Overvoltage

Аннотация

Рассмотрены актуальные вопросы защиты устройств автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта от грозовых перенапряжений. С вероятностной точки зрения рассмотрена эффективность устройств защиты. Для этого разработана модель отказоустойчивости рельсовых цепей, позволяющая прогнозировать применение схем защиты применительно к любому железнодорожному участку с электротягой постоянного или переменного тока. Определена вероятность пробоя изоляции тяговой сети и найдена энергетика грозовых воздействий.

Ключевые слова: грозовые перенапряжения, молния, роговые разрядники, варисторы, выравниватели, рельсовая цепь, контактная сеть, вероятность отказов аппаратуры.

Abstract

Topical issues of protection of railway automation and remote control devices from lightning surges are examined. The efficiency of protection devices is considered from probabilistic point of view. For this purpose the model of resiliency of track circuits is developed that predict the use of protection schemes with respect to any railway section with AC or DC electric traction. The article describes the probability of insulation breakdown of traction network and determines power values of lightning impact.

Keywords: lightning surges, lightning, arcing horns, varistors, levelers, track circuit, contact network, probability of hardware failure.

Разветвленная сеть железных дорог проходит по огромной территории, пересекающей несколько климатических зон, характеризующихся природными контрастами, среди которых существенными являются различия в грозовой активности. Кроме того, даже в пределах одного региона наблюдаются отличия в рельефе территории, геоэлектрическом строении грунтов, индивидуальных условиях местности, интенсивности движения поездов и виде электротяги, что, в свою очередь, связано с числом отказов систем СЦБ. Поэтому в [1] предлагается обоснованный переход от практики выбора средств защиты от перенапряжений к проектированию систем защиты для конкретных эксплуатационных условий. Для совершенствования устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) и прогнозирования надежности устойчивой работы систем СЦБ для конкретно заданного участка необходима вероятностная оценка повреждаемости аппаратуры с учетом используемых методов защиты. В данной работе представлена методика определения вероятности безотказной работы устройств СЦБ от грозовых перенапряжений, приходящих со стороны рельсовых цепей (РЦ), учитывающая такие особенности железнодорожного участка, как род тока электротяги, грозовая интенсивность региона, предельная энергетическая способность УЗИП.

Грозовые перенапряжения в рельсовых цепях возникают от прямого или индуктированного удара молнии в систему тягового электроснабжения при перекрытии изоляции контактной сети, пробоях искрового промежутка рогового разрядника или срабатывания ОПН. Предельное число отказов от перенапряжений со стороны РЦ может быть равно числу случаев возникновения грозовых перенапряжений в рельсовых цепях. Однако этот предельный случай маловероятен, поскольку зависит от множества факторов, включающих удаленность аппаратуры от места воздействия в рельсовую нить, наличия полимерного покрытия в верхнем строении пути, эффективности применяемых УЗИП. Уровень изоляции контактной сети изменяется под действием климатических и иных факторов, принимается рав-

ным уровню импульсного разрядного напряжения изоляторов. До недавнего времени для ограничения атмосферных перенапряжений применялись роговые разрядники, импульсное пробивное напряжение которых составляет 25 и 190 кВ для сети с номинальным напряжением 3,3 и 25 кВ соответственно. Задача вычисления вероятности безотказной работы устройств СЦБ от грозовых перенапряжений без установки УЗИП сводится к определению числа возможных потенциалов, возникающих при грозе, достаточных для перекрытия уровня изоляции контактной сети с заземлением опор на тяговый рельс.

Общее число перекрытий изоляции контактной сети складывается из числа пробоев от перенапряжений прямых $N_{\text{пум}}$ и индуцированных $N_{\text{инд}}$ ударов молнии

$$N_{\text{перекрытий к.с.}} = N_{\text{перекрытий к.с. пум}} + N_{\text{перекрытий к.с. инд}} \quad (1)$$

Учитывая число возможных прямых ударов молнии в контактную сеть за год [2], из которых перекрытие изоляции контактной сети происходит только при токах молнии определенной величины [3], число таких случаев составит

$$N_{\text{перекрытий пум к.с.}} = e^{-U_{\text{пум}} \frac{2Z_{\text{м}} + Z_{\text{к.с.}}}{26Z_{\text{м}} Z_{\text{к.с.}}}} n k L b 10^{-3}, \quad (2)$$

где n — число ударов молнии в землю на 1 км² ее поверхности, отнесенное к одному грозовому дню, принимается равным 0,06 — 0,1;

k — число грозовых дней в году для рассматриваемой местности; S — площадь исследуемой территории, на которой определяется частота поражаемости контактной сети, равная произведению длины линии L на прилегающую к ней ширину полосы земли $b = 8h$ (h — высота подвески контактного провода над землей);

$Z_{\text{м}}$ — волновое сопротивление канала молнии;

$Z_{\text{к.с.}}$ — волновое сопротивление контактной сети.

Учитывая вероятность амплитуды токов молнии [3], с числом ударов в полосу земли шириной db по обе стороны от контактной сети, когда появление индуцированного напряжения перекрывает импульсную прочность изоляции, то число этих случаев составит

$$N_{\text{перекрытий к.с. инд}} = 2n k L \cdot 10^{-3} \int_{8h}^{\infty} e^{-\frac{U_{\text{инд}} b}{1560 \cdot 0,5 h}} db. \quad (3)$$

Вероятностное число случаев в год возникновения атмосферных перенапряжений на контактной сети постоянного тока участка Омского региона Западно-Сибирской железной дороги от прямых и индуцированных ударов молнии представлено на графиках рис. 1. При расчетах использовались данные «Научно-прикладного справочника по климату СССР», где, например, для Омска среднее число дней с грозой $k = 24$. Если не требуется высокая точность в расчетах, то можно воспользоваться картой грозовой деятельности на территории России.

Из общего числа 19 прямых ударов молнии в контактную сеть на 100 км длины, при числе ударов от 17 до 18, приводят к перекрытию изоляции в зависимости от уровня ее прочности. Число индуцированных воздействий молний, при которых

наведенные напряжения превосходят уровень электрической прочности изоляции контактной сети постоянного тока, достигает от 2 до 24 за грозовой сезон. Таким образом, общее число случаев возникновения перенапряжений, превышающих уровень изоляции контактной сети на 100 км длины за год в пределах Омского региона, составляет 19 — 42.

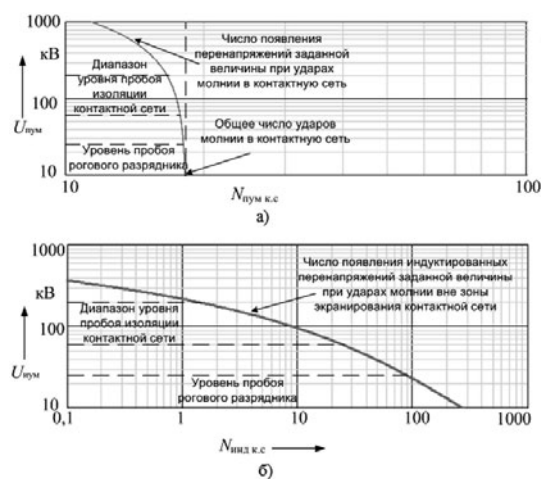


Рисунок 1 — Число случаев в год возникновения перенапряжений с различным амплитудным значением на 100 км длины контактной сети при прямых (а) и индуцированных (б) воздействиях молнии

При использовании роговых разрядников общее число случаев пробоя их искровых промежутков, а следовательно, и воздействий на РЦ для тех же условий может достигать 107, из которых 18 от прямых и 89 от индуцированных ударов молнии. Демонтаж роговых разрядников с 2008 г. в соответствии с указаниями Департамента ЦЭ приводит к уменьшению числа случаев воздействий импульсных токов на РЦ, что является эффективным мероприятием по повышению надежности аппаратуры СЦБ от перенапряжений в грозовые сезоны [4].

При допущении равенства длин блок-участков наибольшей длины 2,6 км максимальный поток отказов сигнальной точки от грозовых перенапряжений со стороны рельсов составит $\max[\omega(t)] = 0,46 — 2,73 \text{ год}^{-1}$ в зависимости от уровня изоляции контактной сети и наличия в ней роговых разрядников.

Защита от перенапряжений со стороны РЦ предусматривает установку УЗИП ограничивающего типа на основе оксидно-цинковых варисторов СН2-2Б и СН2-2В в выравниватели ВОЦШ-220 и ВОЦН-220 [5], а с недавнего времени и ОПН 0,4/0,26/10/500 в УЗП1-500-0,26. Практически определено, что средняя предельная энергетическая способность УЗИП к приведенной энергии составляет 10^4 и $10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ для элементов защиты ВОЦН-220 и УЗП1-500-0,26 соответственно [6].

Число отказов аппаратуры (при повреждаемости УЗИП) с учетом статистического распределения интеграла действия тока молнии (джоулева интеграла W/R) и предельной энергетической способности УЗИП составит

$$N_{\text{поражений УЗИП}} = e^{-7 \cdot 10^{-6} W/R} N_{\text{перекрытий к.с.}} \quad (4)$$

На каждую сигнальную точку, защищенную выравнивателями ВОЦН-220 или ВОЦШ-220, приходится поток отказов от



перенапряжений 0,37 год⁻¹ при максимальном и 0,86 год⁻¹ при минимальном уровнях изоляции контактной сети, а также 2,19 год⁻¹ при установленных в контактной сети роговых разрядников. При защите рельсовой цепи УЗП1-500-0,26 поток отказов на сигнальную точку будет 2,95·10⁻³ год⁻¹ при максимальном и 6,88·10⁻³ год⁻¹ при минимальном уровнях изоляции контактной сети, а также 1,75·10⁻² год⁻¹ при установленных в контактной сети роговых разрядников.

Вероятность безотказной работы за период времени *t* можно определить для принятого экспоненциального закона распределения надежности, принятого за нормативный в системах железнодорожной автоматики [7] (табл. 1).

Показатели безотказности соответствуют наихудшему случаю при отсутствии УЗИП в рельсовой цепи, когда каждое перекрытие от удара молнии изоляции контактной сети сопровождается отказом. Установка выравнивателей ВОЦН-220 улучшает показатели безотказности, но незначительно по причине несовместимости по критерию предельной энергетической пропускной способности. Наибольшая вероятность безотказной работы достигается при установке элемента УЗП1-500-0,26, обеспечивающего энергетический запас при среднестатистическом интеграле квадрата тока молнии. Повышению безотказной работы будет способствовать и выполнение комплекса защитных мероприятий. Например, в отсутствие роговых разрядников показатели безотказности будут определяться и уровнем изоляции контактной сети, при ее увеличении безотказность также растет. Используя данную методику, представляется возможным провести оценку отказов от грозовых перенапряжений со стороны рельсовых цепей на любом железнодорожном участке с учетом вида электротяги, наличия устройств защиты контактной сети, уровня ее изоляции, географических условий местности и типа используемых УЗИП в рельсовой цепи.

Таблица 1 — Практические данные показателей безотказности аппаратуры СЦБ для Омского региона

Случай	Параметр потока отказов, 1/год	Вероятность безотказной работы за один год
Без УЗП1 в РЦ		
При установленных в контактной сети роговых разрядников	2,73	0,065
При демонтированных роговых разрядниках и минимальном уровне изоляции контактной сети	1,07	0,343
При демонтированных роговых разрядниках и максимальном уровне изоляции контактной сети	0,46	0,632
С установкой ВОЦН-220 в РЦ		
При установленных в контактной сети роговых разрядников	2,194	0,111
При демонтированных роговых разрядниках и минимальном уровне изоляции контактной сети	0,861	0,423
При демонтированных роговых разрядниках и максимальном уровне изоляции контактной сети	0,369	0,691
С установкой УЗП1-500-0,26 в РЦ		
При установленных роговых разрядниках в контактной сети	0,00215	0,9979*
При демонтированных роговых разрядниках и минимальном уровне изоляции контактной сети	0,00084	0,9992*
При демонтированных роговых разрядниках и максимальном уровне изоляции контактной сети	0,00036	0,9996*

* При более длительном по времени воздействии показатели безотказности снижаются.

Литература

1. Концепция защиты устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от перенапряжений // Железнодорожный транспорт. Серия «Автоматика и телемеханика»: ЭИ/ЦНТИ, 2006. Вып. 3. 25 с.

2. Рыков И.И., Разевиг Д.В. Атмосферные перенапряжения и защита от них тяговых устройств электрических железных дорог // Труды ВНИИЖТ. 1952. Вып. 56. 88 с.

3. Разевиг Д.В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. 216 с.

4. Гаранин А.Е., Митрохин В.Е. Вероятность отказов аппаратуры автоблокировки в грозовой сезон // Безопасность движения поездов: матер. XI Всерос. науч.-практ. конф. М.: МГТУ ПС, 2010. С. VIII-5, VIII-6.

5. Руководящие указания по защите от перенапряжений устройств СЦБ. М.: Транспорт, 1990. 60 с.

6. Митрохин В.Е., Гаранин А.Е., Бондаренко К.А. Критерий выбора устройства защиты от перенапряжений // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 4. С. 14 — 17.

7. Шаманов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Иркутск: Изд-во ИРИИТ, 1999. 223 с.

References

1. Kontseptsiya zaschity ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki ot perenapryazheniy [Surge protection concept for railway automation and remote control devices] // Zheleznodorozhny transport. «Avtomatika i telemekhanika» series: EI/TsNTI, 2006. Issue 3. 25 p.

2. Rykov I.I., Razevig D.V. Atmosfernye perenapryazheniya i zaschita ot nikh tyagovykh ustroystv elektricheskikh zheleznykh dorog [Atmospheric surges and protection of traction devices at electric railways] // Trudy VNIIZhTa. 1952. Issue 56. 88 p.

3. Razevig D.V. Atmosfernye perenapryazheniya na liniyakh elektroperedachi. [Atmospheric surges on power lines.] M.-L.: Gosenergoizdat, 1959. 216 p.

4. Garaniin A. E., Mitrokhin V.E. Veroyatnost otkazov apparatury avtoblokirovki v grozovoy sezon [Probability of interlocking equipment failure during thunderstorm season] // Railway traffic safety: Proceedings of XI All-Russian Scientific-Practical Conference. M. MG TU PS, 2010. P. VIII-5, VIII-6.

5. Rukovodyaschie ukazaniya po zaschite ot perenapryazheniy ustroystv SCB [Guidelines for surge protection of signaling and interlocking devices] . M.: Transport, 1990. 60 p.

6. Mitrokhin V. E., Garaniin A.E., Bondarenko K.A. Kriteriy vybora ustroystva zaschity ot perenapryazheniy [Selection criteria for surge protection devices] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2011. No. 4. P. 14 – 17.

7. Shamanov V. I. Nadezhnost sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. [Reliability of railway automation and remote control systems] Irkutsk: Publishing house IrIIT, 1999. 223 p.

УДК 629.4.02

Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Виктор Николаевич Филиппов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва,
Игорь Викторович Козлов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва,
Алексей Николаевич Давыдов, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технологии транспортного производства» Челябинского института путей сообщения — филиала ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения»; Челябинск,

ПАРАМЕТРЫ И КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Alexander V. Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor of «Railway Cars» Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Viktor N. Filippov, DSc in Engineering, Professor of «Railway Cars and Rolling Stock» Chair, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia,
Igor V. Kozlov, PhD in Engineering, Associate Professor of «Railway Cars and Rolling Stock» Chair, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia,
Alexey N. Davydov, PhD in Engineering, Head of «Transport Industry Technologies» Chair of Chelyabinsk Transport Institute — subsidiary of FGBOU VPO «Ural State University of Railway Transport», Chelyabinsk, Russia

Parameters And Design Of High-Performance Rolling Stock

Аннотация

К числу перспективных инновационных решений, позволяющих снизить дефицит провозной способности железных дорог, относится создание и внедрение новых транспортных продуктов на основе инновационного подвижного состава, оптимально использующего транспортное пространство и нагрузки на инфраструктуру.

В 1960 — 1976 гг. выполнен целый комплекс исследований по оптимизации основных параметров грузовых вагонов, определяющих конструкцию и условия эксплуатации, позволяющих автоматизировать процесс оптимизации и установить наиболее эффективные параметры и конструктивные схемы вагонов. В результате были определены оптимальные параметры полувагонов и цистерн исходя из минимума приведенных затрат на эксплуатацию данного подвижного состава, отвечающих тогдашним ограничениям по инфраструктуре.

В работе показано, что использование современных условий проектирования вагонов, применение новых материалов при их производстве и сложившихся требований инфраструктуры (осевая и погонная нагрузки, возможности габаритов и др.) позволят на базе разработанных конструкций создать высокопроизводительные инновационные вагоны.

Использование специализированного высокопроизводительного подвижного состава при перевозках грузов на выделенных направлениях даст возможность увеличить провозную способность более чем на треть.

Ключевые слова: инновационный вагон, параметры вагона, восьмиосные вагоны, ходовые части, балансирная система, рельсовая колея.

Abstract

Another promising innovative solution that allows reducing the deficit of traffic capacity of railways is the creation and implementation of new transport products based on the use of innovative rolling stock, using transport space and infrastructure load in optimal way.

In 1960-76, series of studies were carried out with regard optimization of main parameters of freight cars that define the design and operating conditions, allowing to automate optimization process and establish the most effective parameters and structural schemes of cars. As a result, optimal parameters of gondolas and tank cars were determined, based on the minimum specified costs of operation of this rolling stock, meeting infrastructural limits of that period.

The paper shows that the use of modern design environment for car design, new materials used in car production and established infrastructure requirements (axial and linear load, size capabilities, etc.), will allow to create innovative high-performance cars on the basis of developed structures.

The use of specialized high-performance rolling stock for transportation of goods to selected destinations will increase the traffic capacity for more than one third.

Keywords: innovative car, car parameters, eight-axle cars, chassis, balance system, rail track.

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. и материалы краткосрочного стратегического развития предусматривают увеличение провозной способности магистральных линий при гарантированной безопасности движения поездов [1, 2].

Известно, что увеличить провозную способность железнодорожной линии можно двумя путями. Первый — интенсивное развитие инфраструктуры железных дорог с ликвидацией барьерных мест, ограничивающих увеличение пропускной способности линии. Развитие этого направления связано со значительными низкорентабельными инвестициями. Второй — значительный рост провозной способности за счет внедрения большегрузных (инновационных) грузовых вагонов, позволяющих увеличить вес поезда в рамках существующей инфраструктуры [3, 4]. Преимущества второго варианта очевидны: срок окупаемости инвестиций не превышает 8 — 10 лет, а эффект повышения провозной способности сказывается через 3 — 5 лет. Инвестор же (владелец частного подвижного состава) этот эффект рассчитывает по результатам каждой отправки груза.

Среди основных путей повышения эффективности таких вагонов (применение увеличенных габаритов и полное использование их возможностей по ширине и высоте, в том числе и межтележечное пространство, повышение нагрузки на ось до 25 — 27 т, снижение коэффициента тары до 0,18 и др.) наиболее важным является увеличение числа осей вагонов.

В 1960 — 1976 гг. научным коллективом МИИТ под руководством профессора Л.А. Шадура выполнен комплекс исследований по оптимизации основных параметров грузовых вагонов с учетом сложного взаимодействия всех факторов, определяющих конструкцию и условия эксплуатации, позволяющий автоматизировать процесс оптимизации и установить наиболее эффективные параметры и конструктивные схемы вагонов. В частности, были определены оптимальные параметры полувагонов и цистерн исходя из минимума приведенных затрат на эксплуатацию данного подвижного состава (табл. 1).

Тогда же было показано, что железнодорожный состав, сформированный из восьмиосных полувагонов, имеющих погонную нагрузку в пределах 8,3 тс/м, будет иметь массу на 35 — 40% больше по сравнению с составом из четырехосных полувагонов той же длины (на той же инфраструктуре), что соответственно позволяет повысить провозную способность железных дорог.

Всегда (во все времена) при проектировании новых вагонов конструкторы стремились реализовать максимальную допустимую осевую нагрузку, величина которой определяется мощностью верхнего строения пути (рельсы, шпалы, балласт, рельсовые скрепления). Величина осевой нагрузки определяет возможную грузоподъемность вагона, имеющего конкретное число осей. При создании первых восьмиосных вагонов величина допустимой осевой нагрузки находилась в пределах 21,5 — 22,0 тс/ось (см. табл. 1). Если принять осевую нагрузку 25 тс/ось, т. е. такую, какая закладывается для инновационного вагона, и реализовать ее в созданных конструкциях, то восьмиосные вагоны имели бы грузоподъемность 149 — 156 тс, что сравнимо со 160 тс инновационного вагона.

Напомним, что цистерна мод. 15-880 (рис. 1) проектировалась для использования в наливных поездах весом до 10

Таблица 1 — Основные параметры восьмиосных вагонов и оценочные параметры инновационного полувагона

Параметр	Цистерны			Полувагоны			Оценочные параметры инновационного полувагона [3]
	Модель 15-880	Модель 15-1500	С опиранием на скользуны	Модель 12-508	Модель 12-545	С опиранием на скользуны	
Объем кузова, м³	159,5	161,5	161,5	137,5	156	137,5	184
Габарит	Т _ц	1-Т	1-Т	1-Т	Т	1-Т	Т _{пр}
Номинальная грузоподъемность, тс	125	125	128	125	132	128	160
Масса тары, т	51	50,8	48,0	45,174	44,57	41,8	40
Длина по осям сцепления, м	18,69	21,25	21,25	20,24	19,49	20,24	19,04
Осевая нагрузка, тс/ось	22,0	22,0	22,0	21,35	22,0	21,22	25,0
Погонная нагрузка брутто, тс/м	9,42	8,28	8,28	8,44	8,26	8,38	10,5
Погонная нагрузка нетто, тс/м	6,69	5,88	5,95	6,18	6,77	6,32	8,4
Коэффициент тары	0,408	0,4064	0,374	0,361	0,337	0,326	0,25
База тележки, мм	3200	3200	3600	3200	3200	3600	3600

тыс. т на дальневосточном полигоне, что при ограниченной длине приемоотправочных путей можно осуществить только за счет реализации допустимой погонной нагрузки. В данной цистерне реализована погонная нагрузка величиной 9,42 тс/м при допустимой величине 10 тс/м.

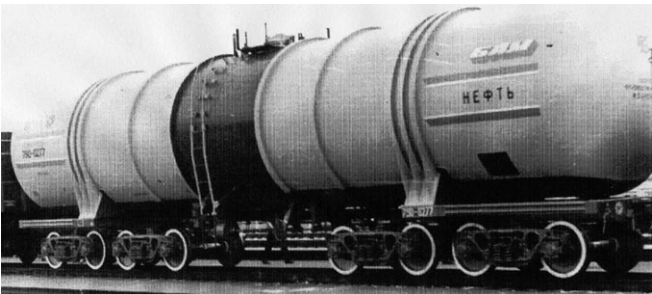


Рисунок 1 — Восьмиосная цистерна модели 15-880 для нефтепродуктов

Следует заметить, что в поездах такой массы на полигоне характеризующемся большим количеством крутых кривых, подъемов и спусков, возникают значительные продольные силы, при которых крайне сложно обеспечить устойчивость четырехосных вагонов от выжимания.

При стопроцентном использовании возможностей осевой $(p_0 = \frac{P+T}{n} \rightarrow const)$ и погонной $(q = \frac{P+T}{2L} \rightarrow const)$ нагрузки увеличить грузоподъемность можно за счет снижения тары вагона. В формулах обозначено: P — грузоподъемность вагона; T — тара вагона; n — число осей; $2L$ — длина вагона по осям сцепления. Тару вагона составляют тара кузова и тара осевых частей (тележек) при соотношении примерно 1:1. Применяемые при проектировании вагонов современные пакеты прикладных программ позволяют в качестве допускае-

мых напряжений использовать предел текучести материала. Использование при изготовлении кузовов материалов с пределом текучести 390 — 450 МПа взамен сталей с $\sigma_T=345$ МПа позволит уменьшить тару кузова на 13 — 30% (3 — 7 т).

В качестве ходовых частей для восьмиосных вагонов использовалась типовая четырехосная тележка мод. 18-101 (рис. 2а), тара которой со штампосварной соединительной балкой составляет 12 т.

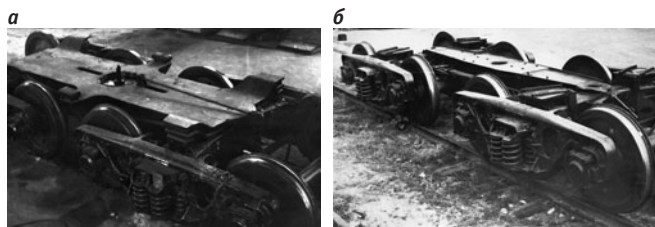


Рисунок 2 — Тележки восьмиосных вагонов: а — четырехосная тележка со штампосварной соединительной балкой; б — тележка восьмиосных вагонов с опиранием кузова на скользящие двухосные тележки

С целью улучшения технико-экономических параметров восьмиосных вагонов МИИТом под руководством Б.С. Евстафьева разработана принципиально новая система опирания кузова вагона непосредственно на скользящие надрессорные балки двухосных тележек (рис. 2б). Применение данных тележек позволяет уменьшить тару вагона на 2 — 3 тс (рис. 3).



Рисунок 3 — Опытный восьмиосный полувагон с опиранием кузова на скользящие двухосные тележки с клиновой балансирующей системой

Реализация этих путей роста грузоподъемности путем снижения тары кузова и тележек позволит увеличить ее на 6 — 10 т и составит 159 — 166 тс в зависимости от конструкции вагона (см. табл. 1).

При разработке восьмиосных вагонов недостатком их конструкции была тяжелая соединительная балка при базе четырехосной тележки 3,2 м. В новом варианте ходовых частей восьмиосных вагонов база четырехосной тележки была увеличена до 3,6 м, что позволило существенно улучшить динамические качества такого вагона и улучшить воздействие на путь. Восьмиосные полувагоны и цистерны с опиранием на скользящие надрессорные балки двухосных тележек прошли всесторонние ходовые динамические, прочностные по воздействию на путь и эксплуатационные испытания в течение 12 лет в замкнутом маршруте на Казахской железной дороге.

При определении достоинств новой конструкции ходовых частей следует иметь в виду, что динамические качества восьмиосных вагонов на всех этапах их создания были существенно лучше, чем у типовых четырехосных вагонов. Величины коэффициентов вертикальной динамики для обрессоренных частей вагонов, полученные при испытаниях на магистральном участке Азербайджанской железной дороги, приведены на рис. 4а, а при движении по искусственным неровностям скоростного полигона ВНИИЖТа — на рис. 4б.

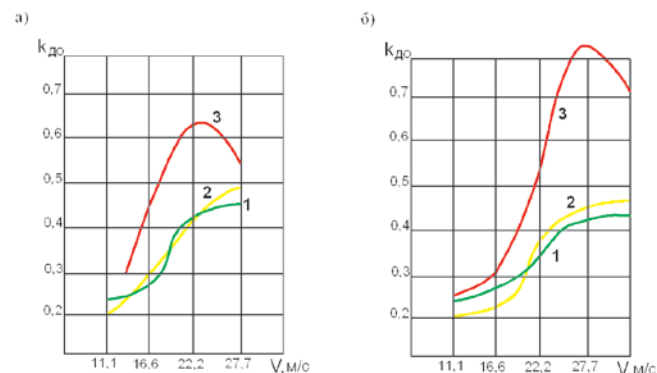


Рисунок 4 — Зависимость от скорости коэффициента вертикальной динамики обрессоренных элементов: 1 — восьмиосный полувагон с клиновой балансирующей системой; 2 — типовой восьмиосный полувагон; 3 — четырехосный полувагон

При проведении прочностных испытаний вагонов с новой схемой ходовых частей определено, что раздельная схема передачи вертикальных и горизонтальных нагрузок от кузова на скользящие существенно снижает уровень напряжений в элементах опорных зон и фактически разгружает зону шкворневого узла при традиционной схеме опирания.

При выборе параметров грузовых вагонов необходимо особое внимание уделять габаритным ограничениям, в частности, у цистерны модели 15-880 габарита $T_{ц}$ при проведении ходовых динамических испытаний была ограничена скорость движения по условиям движения по кривым с максимальным возвышением рельса до 150 мм. Это согласуется с данными М.Ф. Вериги и А.Я. Когана о введении ограничений по величине минимально допустимых скоростей движения в кривых. Следовательно, параметры вагонов должны чрезвычайно четко коррелироваться с параметрами содержания рельсовой колеи.

В 80-х гг. были созданы полувагоны габарита $T_{пр}$, которые подвергались МИИТом всесторонним испытаниям, включая испытания по разгрузке на вагоноопрокидывателях и при режиме односторонней разгрузки на эстакадах. Для беспрепятственного выполнения погрузочно-разгрузочных работ необходимо учитывать указанные выше эксплуатационные режимы.

Узким местом четырехосной тележки с опорами на скользящие надрессорные балки двухосных тележек является необходимость обеспечения равномерной загрузки каждой двухосной тележки и достаточно свободного поворота тележек. С этой целью конструкция тележки имеет балансирующую

систему, чувствительность которой определяет быстроту выравнивания нагрузки между тележками. Разрабатывались две принципиально различные конструкции: механическая и гидравлическая системы перераспределения нагрузки. Первая механическая система была клиновья. Впоследствии для увеличения чувствительности были разработаны катковая и рычажная балансирующие системы (рис. 5). Дальше предложенная гидравлическая система не совершенствовалась ввиду сложности обеспечения герметичности гидравлической системы [5,6]. По нашему мнению, в настоящее время она легко может быть реализована.

Таким образом, по грузоподъемности, tare, осевой и погонной нагрузке, коэффициенту тары восьмиосные вагоны могут быть приравнены к инновационному вагону, призванному обеспечить потребности в перевозках на перспективных полигонах железных дорог [3]. Обращаем внимание на очень важный фактор: данные параметры достигнуты при сохранении традиционной компоновки конструкций грузовых вагонов.

Род груза определяет тип подвижного состава. 2/3 всего объема перевозок приходится на насыпные грузы (уголь, руда, щебень, песок и др.), металлопрокат, лом и наливные грузы, перевозка которых осуществляется в полувагонах и цистернах. В таком случае это будет приватный специализированный подвижной состав, что позволит еще больше увеличить

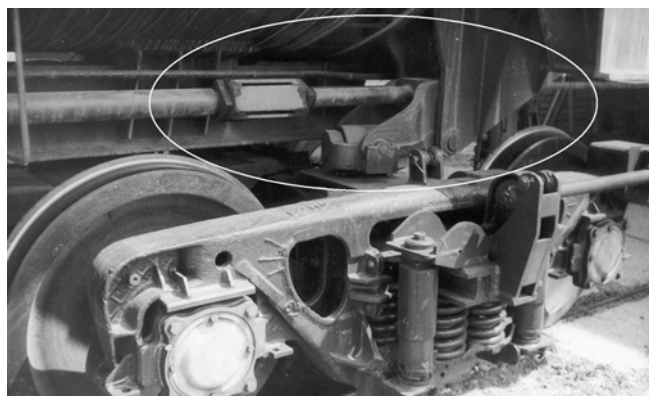


Рисунок 5 — Рычажная балансирующая система восьмиосных вагонов с роликовыми опорами на опытной тележке с гидравлическими гасителями колебаний

его эффективность по сравнению с рассмотренными универсальными вагонами.

Авторы убеждены в том, что максимальное использование имеющихся разработок даст возможность значительно сократить сроки создания инновационных вагонов и, что немаловажно, уменьшить инвестиционные затраты.

Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/media/2010/2/27/28313/file/stragedy.doc>.

2. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года. Белая книга [Электронный ресурс]. URL: <http://rzd-expo.ru/innovation/strategia>

3. Липидус Б.М. Повышение производительности и эффективности железнодорожного транспорта на инновационной основе // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2012. № 5. С. 3 — 6.

4. Липидус Б.М., Соколов А.М. Отраслевая технологическая платформа «Высокопроизводительный грузовой подвижной состав» — путь к использованию резервов провозной способности железных дорог // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2010. № 2. С. 3 — 8.

5. Хусидов В.Д., Филиппов В.Н., Козлов И.В. Восьмиосные вагоны без соединительных балок // Железнодорожный транспорт. 1984. № 4. С. 58 — 61.

6. Большегрузные восьмиосные вагоны / Л.А. Шадур, В.Н. Котуранов, В.В. Лукин и др.; под ред. Л.А. Шадура. М.: Транспорт, 1968. 288 с.

References

1. Strategy of development of railway transport in the Russian Federation to 2030. Approved by the Decree No. 877-p. of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 URL: <http://government.ru/media/2010/2/27/28313/file/stragedy.doc>

2. Strategy of innovative development of JSC "Russian Railways" for the period up to 2015. White Paper. URL: <http://rzd-expo.ru/innovation/strategia>

3. Lapidus B.M. Povyshenie proizvoditelnosti i effektivnosti zheleznodorozhnogo transporta na innovatsionnoy osnove [Increase of productivity and efficiency of rail transport on the basis of innovation] // Bulletin of Research Institute of Railway Transport. 2012. No. 5, p.3 — 6. ISSN 2223-9731

4. Lapidus B.M., Sokolov A.M. Otrasleyaya tekhnologicheskaya platforma «Vysokoproizvoditelnyy gruzovoy podvizhnyy sostav» — put k ispolzovaniyu rezervov provoznoy sposobnosti zheleznnykh dorog [Industry Technology Platform "High Performance freight rolling stock" - the way to use traffic capacity reserves of railways] // Bulletin of Research Institute of Railway Transport. 2010. No. 2. P.3–8. ISSN 2223-9731

5. Khusidov V.D., Filippov V.N., Kozlov I.V. Vosmiosnye vagonny bez soedinitelnykh balok [Eight-axle cars without connecting beams] // Zheleznodorozhnyy transport. 1984. No. 4. P.58–61.

6. Bolshegruznyye vosmiosnye vagonny [Heavy load eight-axle cars] / L.A. Shadur, V.N. Koturanov, V.V. Lukin et al.; edited by L.A. Shadur. M.: Transport, 1968. 288 p.

УДК 621.791.75

Эдуард Гаврилович Бабенко, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск,
Евгений Николаевич Кузьмичев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск,
Евгений Александрович Дроздов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ВАГОННЫХ КОЛЕС, ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКОЙ

Edward G. Babenko, DSc in Engineering, Professor of «Process metallurgy» Chair, Far Eastern State Transport University (FESTU),
Evgeny N. Kuzmichev, PhD in Engineering, Associate Professor of «Process metallurgy» Chair, Far Eastern State Transport University (FESTU),
Evgeny A. Drozdov, PhD in Engineering, Associate Professor of «Rail Cars» Chair. Far Eastern State Transport University (FESTU)

Improving Operational Capability Of Wrought Car Wheels Reworked By Electroslag Surfacing

Аннотация

Разработан способ восстановления обода колеса рельсовых транспортных средств электрошлаковой наплавкой легированным металлом поверхности катания и гребня колеса. Цель достигается средствами в виде полого разборного кристаллизатора, внутреннюю поверхность которого выполняют в поперечном сечении с профилем и параметрами стандартного обода колеса; низкоуглеродистой сварочной проволоки и высоколегированного флюса на основе вольфрама. Механические показатели металла обода колеса, восстановленного предложенным способом, значительно превосходят свойства металла колес, восстановленных другими способами, а также показатели металла стандартного колеса.

Ключевые слова: поверхность катания, гребень колеса, восстановление обода колеса, электрошлаковая наплавка.

Abstract

A way to rework wheel rim of rail vehicles using alloy metal electroslag facing of tread surface and wheel flange has been developed. The goal is achieved by means of a hollow collapsible mould, the inner surface of which is made in the cross section with profile and parameters of the standard rim, low carbon electrode wire and high-doping tungsten-based flux. Mechanical properties of rim metal that was reworked using the proposed method are much superior to the properties of wheel metal reworked with other methods, as well as to standard wheel metal characteristics

Keywords: wheel tread, wheel flange, wheel rim restoration, electroslag surfacing.

С первых дней существования железнодорожного транспорта возникла проблема износа колес и рельсов. Первые токарные станки для обточки железнодорожных колес были смонтированы в Царском Селе в 1844 г. На этих станках точили чугунные колеса первых вагонов и паровозов, когда на них возникали повреждения, угрожающие безопасности движения.

В настоящее время на сети железных дорог ОАО «РЖД» повреждения колес подвижного состава приобрели угрожающие масштабы. Основные неисправности колесных пар выражены износом их гребней и температурными раковинами, возникающими на поверхности катания колеса. В связи с этим железнодорожные инфраструктуры вынуждены нести незапланированные затраты, связанные с предупреждением и устранением повреждений колес, чтобы обеспечить необходимый уровень гарантий безопасности движения поездов.

Упреждающие износ гребней способы достаточно стереотипны и выражаются только лубрикацией их поверхностей.

Устраняют износ гребней колес и поверхностей катания традиционным способом точения на колесно-токарных станках.

В процессе обточки колеса для увеличения толщины гребня на 1 мм необходимо проточить поверхность катания на 3 мм. Таким образом, восстановление гребня колеса обточкой приводит к значительному уменьшению толщины обода цельнокатаного колеса и сокращению его срока службы.

К примеру, количество обточек колесных пар грузовых вагонов за 2012 г. составило в среднем 2,16 на одну колесную пару. В результате срок службы вагонного колеса в среднем равен 5 — 6 лет.

Известны способы восстановления обода колеса путем электродуговой [1, 2] или электрошлаковой наплавки металла на изношенную поверхность [3].

Электродуговая наплавка предназначена преимущественно для восстановления малогабаритных деталей. Использо-

ние электродуговой наплавки, например, для восстановления обода колеса железнодорожного вагона до нормативных размеров приводит к увеличению срока службы колеса. Однако такая технология восстановления не исключает образования термических трещин в ободе колеса из-за неравномерности температурных полей. Недостатком этого способа является повышенная хрупкость металла восстановленной поверхности, которая приводит к ее разрушению в процессе эксплуатации. Поэтому такой способ восстановления в настоящее время на сети дорог не применяется.

Способ электрошлаковой наплавки предназначен для восстановления деталей больших размеров. Использование его для восстановления обода колеса железнодорожного вагона до нормативных размеров обеспечивает увеличение срока службы колесных пар. В настоящее время электрошлаковая наплавка применяется только для восстановления гребня обода колеса при его износе по толщине до предельно допустимого значения.

Способ восстановления заключается в следующем. Изношенный гребень удаляют газовой резкой и нагревают обод вращающегося колеса до температуры 200 — 250°C, с последующей электрошлаковой наплавкой легированного металла на поверхность гребня обода колеса сварочной проволокой с одновременным отпуском наплавленного металла.

Для проведения электрошлаковой наплавки используют полный разборный кристаллизатор, имеющий в поперечном сечении профиль гребня обода колеса. Кристаллизатор устанавливают на части обода колеса в месте срезанного гребня, охватывая сектор колеса. При этом кристаллизатор располагается так, что его поперечное сечение находится в горизонтальной плоскости и перпендикулярно поверхности катания обода колеса, а его открытая сторона примыкает к месту среза гребня. Затем на поверхности катания обода колеса под кристаллизатором закрепляют стартовую пластину.

Для получения легированного металла подбирают сварочную проволоку с высоким содержанием углерода и легирующих элементов, например сварочную проволоку Нп-30ХГСА, которая содержит 0,3% углерода и до 1% хрома, марганца и кремния. Используемый при наплавке флюс АН-8 содержит SiO_2 в пределах 33,0 — 39,0%, MnO — 21,0 — 26,0%, CaF_2 — 3,5 — 8,4%, CaO — 4,0 — 7,0%, MgO — 5,0 — 7,5%, Al_2O_3 — 11,0 — 15,0%, CaF_2 — 13,0 — 19,0%, Fe_2O_3 — 1,5 — 3,5% и является низколегирующим. Флюс в известном способе восстановления гребня обода колеса выполняет функцию защиты наплавленного металла от внешних воздействий.

В процессе наплавки вращение колеса осуществляют вокруг горизонтальной оси при неподвижном кристаллизаторе. Наплавку гребня обода колеса производят в направлении, перпендикулярном оси колеса. Расплавленный металл проволоки и поверхности основного металла обода заполняет кристаллизатор, принимая в процессе кристаллизации профиль гребня. В процессе вращения колеса вокруг своей оси происходит постепенное образование восстановленного гребня по окружности обода. За полный оборот колеса гребень формируется по всему ободу. Наплавленный слой представляет собой углеродистую среднелегированную сталь, в которой насыщение легирующими элементами происходит из сварочной проволоки.

Завершают восстановление обточкой поверхности катания и наплавленной поверхности гребня колеса для устране-

ния на ней шлаковых включений и неровностей, возникающих в результате наплавки.

В результате восстановления получают колесо с профилем гребня, соответствующим стандартному профилю гребня колеса, и толщиной обода в пределах допустимого размера, но меньше толщины нового колеса.

Механические свойства металла восстановленного гребня колеса превышают механические свойства основного металла поверхности катания колеса, повышая износостойкость гребня, работающего в условиях трения скольжения и значительных удельных контактных давлений при движении в кривых участках пути и по стрелочным переводам.

Условия работы поверхности катания обода колеса отличаются от условий работы гребня. Поверхность катания требует иных механических свойств металла (высокая твердость и ударная вязкость), которые в условиях трения качения и постоянных динамических нагрузок на рельсовых стыках, стрелочных переводах и неровностях пути способны исключить образование трещин и выщербин на поверхности катания.

В связи с этим была поставлена задача разработать способ восстановления обода колеса рельсовых транспортных средств с заданными свойствами при сохранении его нормативных параметров после многократных обточек, чтобы увеличить срок службы колесных пар.

Для решения поставленной задачи разработан способ восстановления обода колеса рельсовых транспортных средств электрошлаковой наплавкой легированным металлом поверхности катания и гребня колеса. Цель достигается средствами в виде полного разборного кристаллизатора, внутреннюю поверхность которого выполняют в поперечном сечении с профилем и параметрами стандартного обода колеса; низкоуглеродистой сварочной проволоки и высоколегирующего флюса на основе вольфрама.

Колесо устанавливают в кристаллизатор, располагая внутреннюю грань обода колеса на дно кристаллизатора с обеспечением параллельности профилей обода колеса и кристаллизатора, а также с обеспечением их соосности по вертикали. Наплавку производят параллельно оси колеса в направлении от гребня при одновременном вращении колеса и кристаллизатора.

Предлагаемый способ восстановления обода колеса позволяет восстанавливать его до геометрических параметров нового колеса. Восстановление происходит при равномерном нагреве по всей поверхности колеса, что исключает образование термических напряжений и появление поверхностных трещин. Использование высоколегирующих флюсов позволяет получать необходимые физико-механические свойства наплавленного металла гребня и поверхности катания.

На рис. 1 представлен разрез кристаллизатора для восстановления обода колеса рельсовых транспортных средств с установленным в кристаллизаторе колесом, иллюстрирующий и подтверждающий работоспособность и промышленную применимость способа.

Восстановление обода цельнокатаного колеса осуществляют только при уменьшении его толщины до предельно допустимого значения, например, для грузовых вагонов эта величина составляет 22 мм [4, 5].

Для электрошлаковой наплавки используют высоколегирующий флюс на основе оксидов кремния, марганца, вольфрама и циркония, являющихся легирующими компонента-

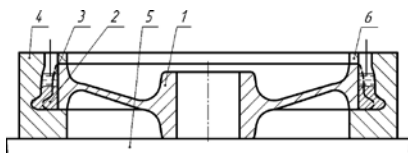


Рисунок 1 — Схема восстановления гребня и поверхности катания колеса электрошлаковым переплавом:

1 — колесо; 2 — гребень; 3 — поверхность катания; 4 — кристаллизатор; 5 — поворотная платформа; 6 — выводная втулка

ми. В качестве экспериментальных флюсов использовались разработанные авторами керамические легирующие флюсы [6 — 8], содержащие графит, фторид кальция, бадделеитовый концентрат и шеелитовый концентрат с содержанием оксида вольфрама 45 — 72%, оксида железа 10 — 25%, оксида марганца 2 — 10% и оксида кремния 3 — 8%, оксид циркония 0,5 — 3%, а также нелегированная электродная проволока Св-10ГА с содержанием углерода в пределах 0,08 — 0,1%.

Колесо с предварительно удаленным гребнем устанавливают в кристаллизаторе, располагая внутреннюю грань обода колеса на поворотной платформе, совмещая их оси и обеспечивая параллельность профилей обода колеса и кристаллизатора. На наружную грань обода колеса устанавливают выводную втулку для поддержания заданного уровня шлаковой ванны при полностью наплавленном ободе колеса. Далее производят нагрев обода колеса до температуры 200 — 250°C. В полость между стенкой кристаллизатора и ободом колеса засыпают высоколегирующий флюс и вводят равномерно по окружности не менее 8 электродных проволок.

Для расплавления флюса используют электродугую сварку. После расплавления всего флюса и образования шлаковой ванны колесо с кристаллизатором приводят во вращение вокруг своей оси со скоростью, достаточной для поддержания шлаковой ванны в жидком состоянии в течение всего процесса наплавки (не менее 1 об/мин). В процессе наплавки производится отпуск наплавленного металла путем постоянного подогрева обода колеса индукционными нагревателями.

Процесс наплавки начинается от внутренней грани обода колеса с нерабочей поверхности гребня, идет в сторону поверхности катания и заканчивается у наружной грани обода колеса благодаря расположению колеса внутренней гранью обода на дне кристаллизатора.

В первоначальный момент расплавленный металл электродной проволоки проходит в кристаллизаторе через расплавленный шлак. Легирующие элементы в шлаке еще находятся в оксидной форме и не поступают в расплавленный металл. Низкоуглеродистая нелегированная сталь электродной проволоки не получает из шлака легирующие элементы и после кристаллизации сохраняет свои первоначальные свойства. В результате нерабочая поверхность гребня обода колеса, с которой начинается процесс наплавки, наплавляется нелегированным металлом.

С повышением температуры расплавленного флюса в нем происходят восстановительные реакции освобождения легирующих элементов из их оксидов. Расплавленный металл электродной проволоки, проходя через такой шлак, максимально обогащается легирующими элементами: марганцем, кремнием, вольфрамом и цирконием. Легирующие элементы, попадая в металл проволоки, образуют интерметаллидные со-

единения, карбиды и растворы в железе и после кристаллизации металла улучшают его механические свойства. В результате рабочая поверхность гребня обода колеса наплавляется высоколегированным металлом.

В дальнейшем при увеличении высоты наплавленного металла концентрация легирующих элементов в шлаке уменьшается, и каждая следующая порция расплавленного металла проволоки извлекает все меньшее количество легирующих элементов. Уменьшение содержания легирующих элементов, попавших в металл проволоки после кристаллизации расплава, вызывает соответствующее ухудшение механических свойств металла. В результате процесс наплавки поверхности катания обода колеса осуществляется уже низколегированным металлом.

После завершения наплавки и охлаждения металла кристаллизатор разбирают, убирают выводную втулку и получают восстановленное колесо с габаритами, несколько превышающими параметры стандартного колеса. Затем колесо очищают и обтачивают для получения обода с гладкой поверхностью и параметрами стандартного колеса.

Рабочая поверхность гребня обода колеса из высоколегированного металла обладает твердостью и износостойкостью, необходимой для работы в условиях трения скольжения и больших удельных давлений в контакте.

Поверхность катания обода колеса из низколегированного металла обладает высокой ударной вязкостью и упругостью, что необходимо для работы в условиях трения качения при высоких ударных нагрузках.

Таким образом, срок службы обода колеса увеличивается за счет восстановления его размеров до номинальных размеров нового колеса и формирования на поверхности катания легированного металла со свойствами, соответствующими условиям работы, что позволяет приблизить его к сроку службы оси колесной пары.

В Дальневосточном государственном университете путей сообщения проведены опыты по наплавке части обода вагонного цельнокатаного колеса предлагаемым способом.

Металлографический анализ наплавленного металла проводился с помощью микроскопов Лабомет-2 и агрегатного ЕС МЕТАМ РВ-21 при увеличениях до 1000X. Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3М. Дифференциально-термический анализ осуществлялся на дериватографе Q-1000. Фазовый состав полученных материалов изучался на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-7». Исследование элементного состава полученных сплавов проводилось на рентгеновском флуоресцентном кристалл-дифракционном сканирующем спектрометре «Спектроскан МАКС-JV» и растровом электронно-зондовом микроскопе ISM-35C (JEOL, Япония) с приставкой электронно-зондового микроанализатора — рентгеновского спектрометра 35-SDS с волновой дисперсией.

Для анализа физико-механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла использовались следующие приборы: для измерения твердости — ТШ-2М, ТК-14, ТП-2; для исследования износостойкости — машина ИИ-5018 в условиях трения без смазки при нагрузке 50 кгс/мм² и контртелом из стали 40ХН, закаленной в масле до HRC 60 — 62. Результаты механических испытаний приведены в табл. 1.

Результаты испытаний показывают, что механические показатели металла обода колеса, восстановленного предложенным способом, значительно превосходят свойства ме-

талла колес, восстановленных другими способами, а также показатели металла стандартного колеса.

Получение металла на различных поверхностях обода колеса с необходимыми свойствами для работы в соответствующих условиях приводит к повышению срока службы колесных пар.

Результаты исследований показали применимость такого способа восстановления обода колеса в условиях специализированных ремонтных подразделений.

Использование разработанного способа восстановления обода колеса транспортного средства позволяет получить восстановленное колесо с габаритами стандартного колеса, улучшенными показателями металла рабочих поверхностей обода колеса как для рабочей поверхности гребня, так и для поверхности катания колеса, что значительно снижает затраты на приобретение колесных пар.

Таблица 1 — Физико-механические показатели металла ободьев колес

Механические свойства наплавленного металла	Колесо, восстановленное ЭШН				Новое колесо	
	Флюс по пат. № 2207388 [6]		Флюс по пат. № 2424091 [7]			
	поверхность гребня	поверхность катания	поверхность гребня	поверхность катания	поверхность гребня	поверхность катания
HB	228 — 245	227 — 234	246 — 262	236 — 253	235	235
σ_B , кгс/мм ²	46	44	47	45	42	42
α_H , кгс·м/см ²	18,5	18,3	18,7	18,4	18,3	18,3
α_{H45} , кгс·м/см ² , $T = -60^{\circ}\text{C}$	5,5	5,2	5,7	5,3	4,2	4,2
Коэффициент износостойкости	0,93	0,93	1,1	1,1	0,87	0,87

Литература

1. Технологическая инструкция по восстановлению наплавкой под флюсом гребней колесных пар цельнокатанных вагонных колес. ТИ-5-02-95.

2. Пат. 2113325 Российская Федерация, МПК B23K9/04, B23P6/00. Способ восстановления поверхности катания вагонных колес / Козубенко И.Д., Скосырский Н.Г., Бызова Н.Е., Корчагин А.П., Павлов Н.В. ; № 97101271/02 ; заявл. 24.01.97 ; опубл. 20.06.98, Бюл. № 17.

3. Пат. 2095211 Российская Федерация, МПК B23K9/04, B23P6/00. Способ восстановления изношенных гребней колес рельсовых транспортных средств / Кожевин Г.В., Кашицев В.А., Трошкин Б.И., Линский Н.Г. ; № 95105268/02 ; заявл. 06.04.95 ; опубл. 10.11.97, Бюл. № 32.

4. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию вагонных колесных пар ЦВ-944. М. : Транспорт, 2006.

5. Инструкция по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. ЦТ-329. М. : Техинформ, 2000.

6. Пат. 2207388 Российская Федерация, МПК C22B9/18, B23P6/00. Способ электрошлакового переплава / Бабенко Э.Г., Кузьмичев Е.Н., Верхотуров А.Д. ; № 95105268/02 ; заявл. 06.04.95 ; опубл. 10.11.97, Бюл. № 18.

7. Пат. 2424091 Российская Федерация, МПК, B23K9/04, B23K35/36, C22B9/18. Флюс для электрошлаковой сварки или наплавки при восстановлении деталей или электрошлакового переплава / Бабенко Э.Г., Кузьмичев Е.Н., Дроздов Е.А., Колесников М.А. ; № 2009125939/02 ; заявл. 06.07.2009 ; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.

8. Керамические флюсы на основе минеральных концентратов для восстановления деталей подвижного состава / Э.Г. Бабенко, Е.Н. Кузьмичев, Е.А. Дроздов // Транспорт Урала. 2012. № 4 (35). С. 17 — 20.

References

1. Instruction manual for flux surfacing restoration of wheelset flanges of wrought car wheels. ТИ-5-02-95.

2. Patent 2113325 RF, MPK B23K9/04, B23P6/00. Method of restoring tread surface of rail car wheels / Kozubenko I.D., Skosyrskiy N.G., Byzova N.E., Korchagin A.P., Pavlov N.V.; No. 97101271/02 ; filed on 24.01.97 ; published on 20.06.98, Bulletin No. 17.

3. Patent 2095211 RF, MPK B23K9/04, B23P6/00. Method of restoring worn wheel flanges of rail vehicles / Kozhevinn V., Kanishev V.A., Troshkin B.I., Linskiy N.G.; No. 95105268/02; filed on 06.04.95; published on 10.11.97, Bulletin No. 32.

4. Instruksiya po osmotru, osvidetelstvovaniyu, remontu i formirovaniyu vagonnykh kolesnykh par [Instruction for inspection, survey, repair and formation of car wheel sets] TsV-944. M. Transport, 2006.

5. Instruksiya po formirovaniyu, remontu i soderzhaniyu kolesnykh par tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog kolei 1520 mm. [Instructions for forming, repair and maintenance of wheelsets of traction rolling stock of 1520 mm gauge railway] TsT-329. M. Tekhinform, 2000.

6. Pat. 2207388 RF, MPK C22B9/18, B23P6/00. Electroslag remelting method / Babenko E.G., Kuzmichev E.N., Verkhoturov A.D.; No. 95105268/02; filed on 06.04.95; published on 10.11.97, Bulletin No. 18.:

7. Pat. 2424091 RF, MPK, B23K9/04, B23K35/36, C22B9/18. Flux for electroslag welding or surfacing in the recovery of parts or electroslag remelting / Babenko E.G., Kuzmichev E.N., Drozdov E.A., Kolesnikov M.A.; No. 2009125939/02; filed on 06.07.2009; published on 20.07.2011, Bulletin No.20.

8. Keramicheskie flyusy na osnove mineralnykh kontsentratsion dlya vosstanovleniya detaley podvizhnogo sostava / E.G. Babenko, E.N. Kuzmichev, E.A. Drozdov [Ceramic fluxes based on mineral concentrates for restoration of rolling stock parts] // Transport of the Urals. 2012. No.4 (35). P. 17– 20.

УДК 629.463.65

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА ИЗ УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ПРИ ВИБРОРАЗГРУЗКЕ

Vasily F. Lapshin, DSc in Engineering, Professor of «Railway Cars» Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT),
Konstantin O. Dolgikh, Assistant of «Railway Cars» Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT)

Improving The Design Of Gondola Car Body With A View To Ensure Integrity During Vibration Unloading

Аннотация

Рассмотрены варианты решений конструктивного исполнения обшивки боковых стен кузовов полувагонов. Отмечены принципиальные отличия типовой обшивки из листовых профилей с периодическими гофрами от обшивки из гладкого профиля, профилей изотропной жесткости и со сквозными гофрами. Основная цель работы — обоснование возможности применения в качестве обшивки боковой стены кузова полувагона профилей со сквозными гофрами исходя из условия обеспечения сохранности при воздействии вибрационной нагрузки.

Теоретическую основу работы составила разработанная ранее методика компьютерного моделирования нагруженности механической системы «вибромашина — кузов — тележка». Для определения значений вибронапряжений в элементах боковой стены разработана конечно-элементная модель кузова полувагона с обшивкой из профилей со сквозными гофрами.

На основе разработанной модели кузова получены динамические напряжения, возникающие в элементах боковой стены при нагружении вынуждающей силой накладной вибрационной машины. Показано, что максимальный уровень напряжений возникает в зонах приварки листов обшивки к промежуточным стойкам. Однако значения напряжений в обшивке боковой стены из профилей со сквозными гофрами ниже на 44% по сравнению с типовым решением, а коэффициент запаса усталостной прочности в зонах приварки листов обшивки к стойкам больше на 65% и на 33% — для углов горизонтальных гофров.

Ключевые слова: полувагон, боковая стена, обшивка, профиль с чередующимися гофрами, профиль со сквозными гофрами, методика компьютерного моделирования, конечно-элементная модель кузова, модальный анализ, спектр собственных частот, частота нагружения, амплитуда вынуждающей силы, динамические напряжения, коэффициент запаса усталостной прочности, режим нагружения.

Abstract

Different options of design solutions for body sheathing of gondola side walls are considered. Fundamental differences between standard sheathing made from sheet profiles with periodic corrugations and sheathing made from smooth profile, profiles with isotropic stiffness and cross-cutting corrugations are highlighted. The main purpose of the work was to justify the possibility of use of cross-cutting corrugation profiles as sheathing for gondola side walls, subject to providing safety when exposed to vibration loads.

The theoretical basis of the methodology was the previously developed computer simulation of mechanical system «vibrator-body-bogie» load. To determine the values of vibrating stresses in elements of the side wall, finite element model of gondola body with cross-cutting corrugation sheathing is developed.

Based on the developed body model, dynamic stresses were obtained arising in the side wall elements when loaded by driving force of the vibrating machine. It is shown that the maximum stress level occurs in the areas where the sheathing is welded to intermediate posts. However, the stresses in the side wall sheathing made of profiles with cross-cutting corrugations are lower by 44% compared to the standard solution, and the fatigue strength safety factor in the areas where the sheathing is welded to intermediate posts is higher by 65% and 33% - for horizontal corrugation corners.

Keywords: gondola, side wall, sheathing, profile with alternating corrugations, profile with cross-cutting corrugations, computer simulation technique, finite element model of the body, modal analysis, natural frequencies spectrum, loading frequency, driving force amplitude, dynamic stress, fatigue strength safety factor, loading mode.

В качестве обшивки боковых стен полувагона модели 12-132 используются листовые профили с периодически повторяющимися продольными гофрами. Как показала эксплуатация таких полувагонов в 2004 — 2009 гг., отказы элементов конструкции вагона в результате разгрузочных операций с применением вибромашин примерно в 11 раз превышали допустимое значение по сроку службы [1, 2]. Уже после первого года эксплуатации более 90% полувагонов имели отрывы листов обшивки от стоек боковой стены и трещины до 200 мм в углах верхнего и среднего гофров первой и второй панелей. Это связано в первую очередь с изменением системы ремонта вагонов, увеличением интенсивности подачи вагонов под виброразгрузку — до 16 раз в месяц [3], увеличением высоты кузова до 2365 мм и нередко нарушением требований ГОСТ 22235-2010 [4] по обеспечению сохранности полувагонов при разгрузке с применением вибромашин.

С 2008 г. ведется поиск решений конструктивного исполнения обшивки полувагонов. Для исключения повреждений обшивки ОАО «НПК «Уралвагонзавод» была разработана конструкция боковой стены с обшивкой из гладкого листа толщиной 4,5 мм [5]. Однако применение гладкой обшивки снижает изгибную жесткость, что приводит к выпучиванию обшивки между стойками. Кроме того, из-за большой толщины листа увеличивается масса полувагона. В работе [6] взамен профилей высокой жесткости (ПВЖ), обладающих повышенной жесткостью лишь в продольном направлении, предложены профили изотропной жесткости (ПИЖ), обладающие повышенной жесткостью как в продольном, так и в поперечном направлениях. Представляет интерес вариант обшивки боковых стен полувагона с использованием профилей со сквозными гофрами [5]. Принципиальное отличие данного варианта от типового решения заключается в геометрических размерах и направлении (во внутрь кузова) выштамповок гофров.

В настоящее время, согласно ТУ 14-101-789-2008 [7], верхние и нижние листы обшивки боковой стены полувагона модели 12-132 могут быть изготовлены с применением двух профилей — с периодически повторяющимися гофрами и сквозными гофрами (рис. 1). Верхний лист обшивки изготавливается толщиной 3,6 мм из низколегированных марок сталей 09Г2 класса прочности 295 и 09Г2С класса прочности 345. Нижний лист — из листового профиля толщиной 4,0 мм.

Цель настоящей работы заключается не столько в конструктивной проработке кузова полувагона модели 12-132 с обшивкой со сквозными гофрами, сколько в обосновании возможности применения такого технического решения и определении путей повышения эксплуатационной надежности при воздействии вибрационной нагрузки.

Исследование нагруженности кузова полувагона выполнялось на основе методики компьютерного моделирования, изложенной в работе [8]. Процесс моделирования нагруженности кузова вагона описывался блочной схемой, которая включала следующие модули: подготовка компьютерных моделей «вибромашина», «кузов», «тележка»; формирование имитационной модели механической системы «вибромашина — кузов — тележка»; моделирование нагруженности кузова полувагона механической системы «вибромашина — кузов — тележка».

В качестве объекта исследования был принят вариант конструкции кузова с измененными профилями стоек и про-

филями обшивки боковой стены. В качестве стоек боковой стены использован швеллер 20В-2. Обшивка выполнялась из листов со сквозными гофрами по ТУ 14-101-789-2008 [7]. При этом гофры располагались выштамповками во внутрь кузова по всей длине боковой стены. Нагружение кузова осуществлялось путем приложения вибрационной нагрузки к верхней обвязке, что соответствует условиям разгрузки полувагонов с применением накладных виброустройств.

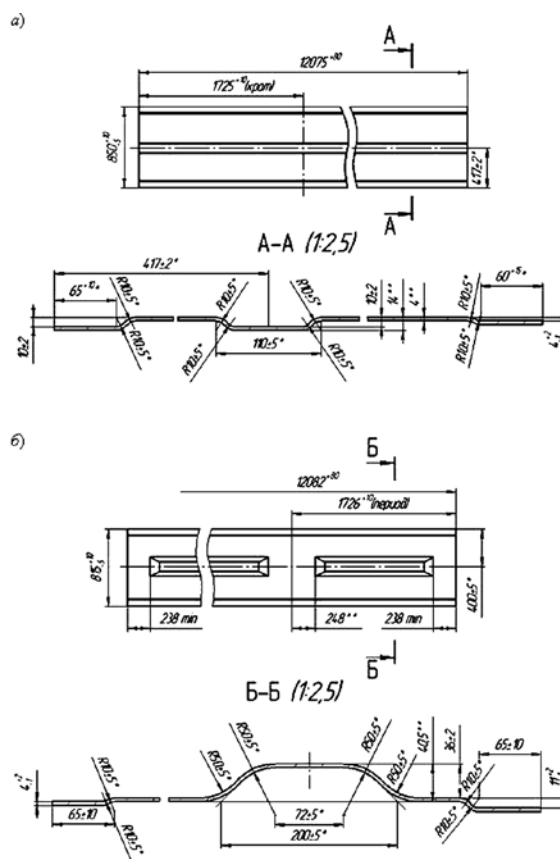


Рисунок 1 — Профили нижнего листа обшивки боковой стены кузова полувагона:
а — со сквозным гофром; б — с периодически повторяющимися продольными гофрами

В соответствии с принятой методикой [8] была разработана конечно-элементная модель «кузов» (рис. 2), включающая в себя 32448 конечных элементов, 30644 узлов, 183864 степеней свободы. Твердотельные модели «вибромашина» и «тележка» заимствованы из ранее выполненных работ [8].

При формировании общей модели механической системы «вибромашина — кузов — тележка» использовалось контактное взаимодействие типа «точка — плоскость», входящее в стандартный набор программных процедур аналитической программной среды «Универсальный механизм». При этом контакт между моделями считался односторонним, а плоскость контакта неограниченной. Модель силового взаимодействия кузова и надрессорной балки в узле «пятник — подпятник» включала 8 контактных взаимодействий. Силовое воздействие вибромашин на верхнюю обвязку кузова осу-

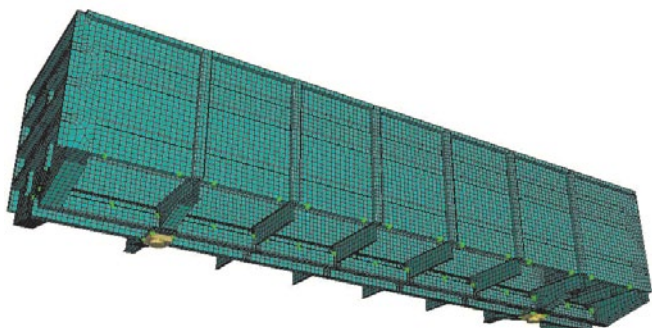


Рисунок 2 — Конечно-элементная модель кузова полувагона с обшивкой со сквозными гофрами

ществлялось через 108 точек контакта, расположенных на верхней обвязке по всей длине действия опорных поверхностей вибромашины.

Объединенные таким образом модели в единую систему «вибромашина — кузов — тележка» представлены на рис. 3. Процедура компьютерного моделирования включала четыре численных эксперимента:

- модальный анализ конструкции кузова полувагона;
- анализ напряженного состояния элементов кузова, в частности боковой стены;
- оценку ресурса элементов боковой стены по коэффициентам запаса усталостной прочности;
- решение технологических задач.

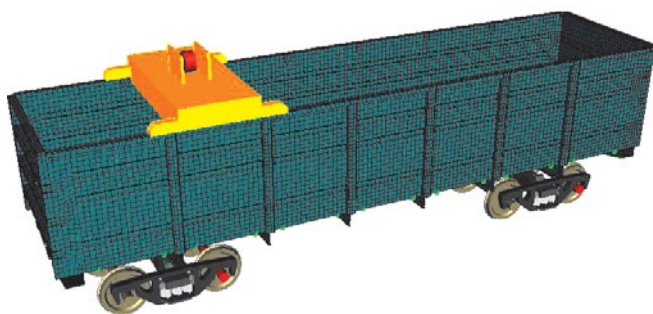


Рисунок 3 — Компьютерная модель механической системы «вибромашина — кузов — тележка»

На первом этапе исследований выполнен модальный анализ конструкции кузова. С целью проверки возможности использования безтрансмиссионных вибромашин с частотой вынуждающей силы 24 Гц и исключения резонансных явлений определены зоны, свободные от собственных частот колебаний. На числовой оси (рис. 4) показаны зоны (заштрихованы), занятые собственными частотами колебаний. Как следует из рис. 4, частота нагружения 24 Гц находится в зоне, свободной от собственных частот, а ширина этой зоны составляет 3,222 Гц. Анализ форм колебаний элементов конструкции кузова в области частот, близких к частоте нагружения вынуждающей силой накладной вибромашин, показал, что наибольшие перемещения элементов боковых стен приходятся на листы обшивки в зоне среднего и нижнего гофров.

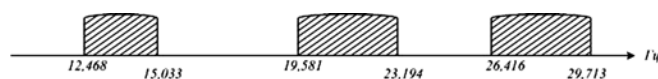


Рисунок 4 — Зоны частот собственных колебаний кузова полувагона

На втором этапе выполнена оценка напряженного состояния элементов боковой стены. Расчеты выполнялись при следующих параметрах накладной вибромашин: амплитуда вынуждающей силы — 88 кН, масса — 7500 кг, частота нагружения варьировалась в диапазоне 20 — 28 Гц с шагом 1 Гц. Вибромашина устанавливалась над первой тележкой с перекрытием опорными поверхностями двух стоек (шкворневой и первой промежуточной). На рис. 5 приведена схема размещения и нумерация точек, по которым выполнялась оценка напряженного состояния.

В ходе численного эксперимента определялись суммарные напряжения σ_{Σ} в металлоконструкции рассматриваемого варианта боковой стены от действия динамических (вибрационных) и статических (от веса вибромашин и остатков груза) нагрузок. В табл. 1 представлены точки, в которых значения напряжений превышали 25 МПа.

Таблица 1 — Значения напряжений в конструкции боковой стены

№ точки (рис. 5)	Значения напряжений σ_{Σ} , МПа								
	20 Гц	21 Гц	22 Гц	23 Гц	24 Гц	25 Гц	26 Гц	27 Гц	28 Гц
7	23,8	26,2	31,2	31,2	29,2	26	25,6	25,6	27,7
8	23	25	30,2	30,3	28,2	25	25	24,9	26,8
12	27,6	26,5	32,2	29,2	27,9	29,5	32,4	35	34
13	27,7	26,7	32,8	29,9	28,4	30	32,9	35,4	34,4
23	19,7	22,5	27,5	26,7	25,3	24,6	24,8	25,9	26,2
24	23,4	26,8	28,6	27,6	26,3	25,8	24,2	26	26,3
25	21,9	24,4	27,6	27	25,6	24,4	22,8	22,8	24,2
49	32,9	35,3	34,1	29	28,3	31,7	36,2	46,8	47,3
50	32,3	34,5	32,8	27,6	28,3	33,7	41	56	57,3
51	30,2	32,4	32,5	29,8	28,2	27	26,7	26,7	24,5
52	23,2	25,5	28,3	27,5	27,9	29,2	35,4	45,2	44,6
53	27,4	29,2	31,2	29,3	29	29,6	33,5	39,2	38,2
54	39,9	41	40,9	38,7	38,4	38,5	41,6	45,6	46,4
55	35,6	36,7	36,3	33,8	33,2	32,9	34,2	35,6	34,7
61	27,4	29,8	30,2	27,7	26,3	25,1	25,1	25,5	22,4
62	27	29,3	29,5	26,9	25,2	23,8	23,2	23,4	21,9
65	29,5	31,6	31,5	28,6	27	26,1	25,8	26,5	26
66	33,6	35	34,7	31,6	30,4	30,3	30,3	30,8	29,8
67	30,8	32,3	31,8	28,7	27,4	27,5	27,3	28,5	26,8
68	28,9	30,4	30	27	25,7	25,6	25,4	26,6	25,1
92	25,7	27,2	26,1	23,6	26,4	28,9	37,5	54,3	47
215	26,2	28,7	30,6	29	27,4	26,8	27,3	29,4	26,4
216	25,3	27,6	29,6	28,5	27,3	27	28,2	33,3	29,2
217	24,1	26,6	29,1	28	27	27,3	29,5	35,3	30,3
218	30,4	32,6	34	32,4	30,5	29,4	29,1	30,2	29,2
219	27,1	29	30,2	28,3	26,7	25,6	25,4	25,7	24,9
220	26,7	29,1	29,8	27,4	25,4	24	24,2	26	27
233	25,8	28	29,1	27,3	25,7	24,9	25	25,1	24,1
234	26,8	29	29,7	28	26,7	26,7	26,8	26,7	25,7
235	25,9	27,8	28,6	27	25,7	25,4	25,6	25,7	23,6
285	26,5	31,2	34,8	31,2	29	30	27	29	38,2
293	32,6	36,9	37	30,2	28	31,1	34,6	35,6	28

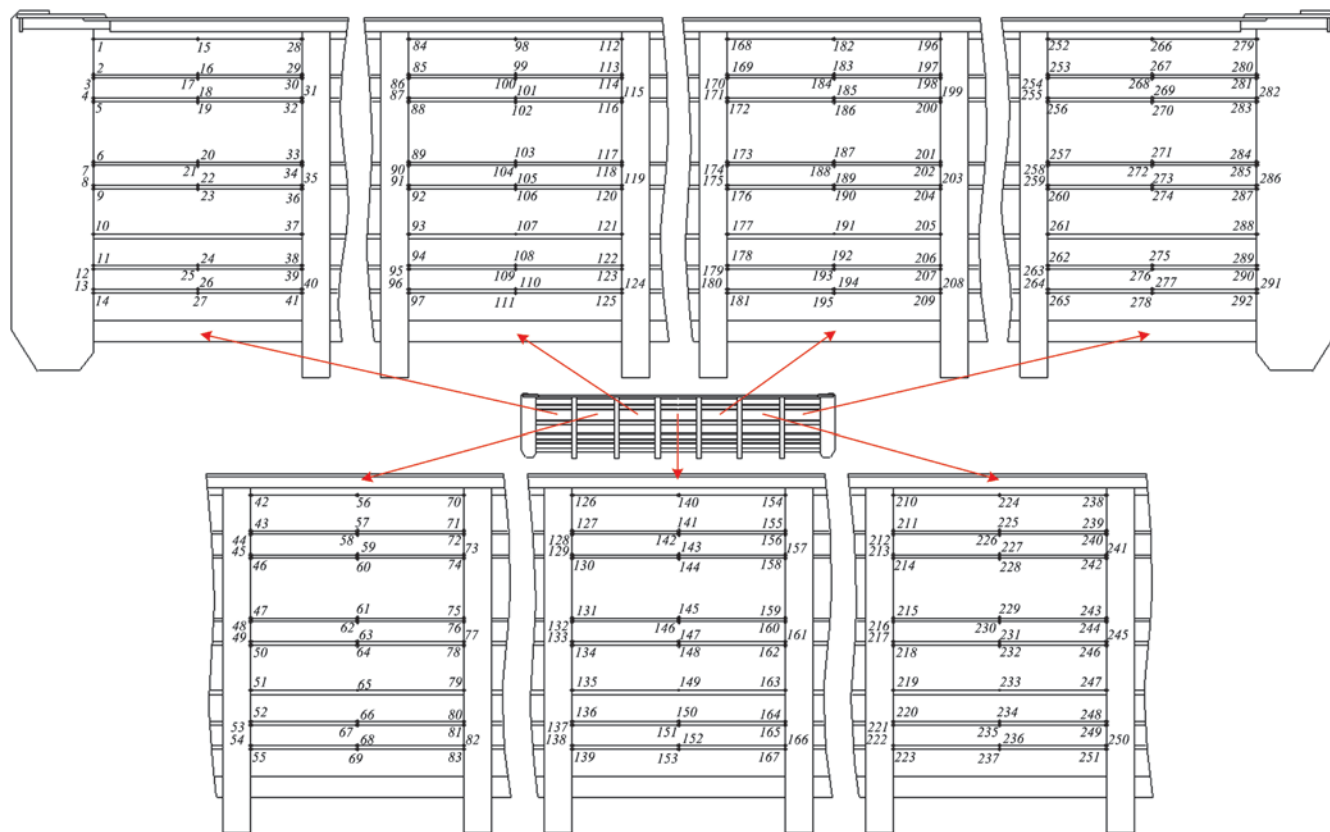


Рисунок 5 — Схема расположения точек, принятых для исследования на боковой стене полувагона

Значения суммарных напряжений в рассматриваемом диапазоне частот нагружения вагона составляют 21 — 58 МПа. Причем максимальные значения напряжений наблюдаются при частоте нагружения 27 — 28 Гц в зоне приварки обшивки к шкворневым стойкам (точки 49, 50, 54, 92). На рабочей частоте безтрансмиссионных вибромашин (24 Гц) суммарные напряжения составляют 25 — 38 МПа с максимальными значениями в точках 54, 218, расположенных на выштамповках сквозных гофров в местах приварки листов обшивки к стойкам боковой стены.

В качестве примера на рис. 6 приведены зависимости напряжений в рассматриваемом диапазоне частот для наиболее нагруженных точек. Из рис. 6 видно, что амплитуды суммарных напряжений в элементах боковой стены при частотах вынуждающей силы 24 и 25 Гц имеют «потенциальную яму» с минимальными значениями.

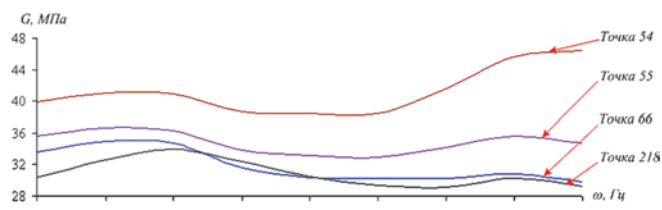


Рисунок 6 — Зависимости напряжений в элементах кузова от частоты нагружения

В работе [8] приведены данные о величине суммарных напряжений в элементах обшивки типовой конструкции полувагона модели 12-132. Значения суммарных напряжений для порожнего вагона составляют 37 — 66 МПа, что в среднем на 38 — 42% превышает значения напряжений в металлоконструкции кузова с использованием профилей со сквозными гофрами.

На третьем этапе выполнена оценка ресурса боковой стены по коэффициентам запаса усталостной прочности (согласно п. 3.2.5 «Норм для расчета» [9])

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\omega}} \geq [n], \quad (1)$$

где $\sigma_{a,N}$ — предел выносливости (по амплитуде) натурной детали при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения на базе испытаний N_0 (для деталей вагонов принималась база испытаний $N_0 = 10^7$ циклов); $\sigma_{a,\omega}$ — расчетная величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базе N_0 ; $[n]$ — допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости, $[n] = 1,8$.

Для элементов металлоконструкции кузова полувагона с наибольшими по величине напряжениями результаты расчета коэффициента запаса усталостной прочности при частоте вынуждающей силы 24 Гц приведены в табл. 2.

Сравнивая максимальные значения напряжений, полученные при исследовании предлагаемой конструкции ку-

Таблица 2 — Значения коэффициента запаса усталостной прочности

№ точки	$\sigma_{a, \text{нр}}$ МПа	$\sigma_{a, \text{пр}}$ МПа*	$\sigma_{a, \text{д}}$ МПа	n
7	71	29,2	32,7	2,17
8	71	28,2	31,5	2,25
13	71	28,4	32,2	2,2
53	71	29	33	2,15
54	71	38,4	44,7	1,59
55	43,3	33,2	38,9	1,11
60	43,3	30,4	33,8	1,28
218	43,3	30,5	35,6	1,22
285	43,3	29	32,9	1,32
293	43,3	28	31,6	1,37

* $\sigma_{a, \text{пр}}$ — амплитуды напряжений, полученные в результате моделирования.

зова полувагона, с данными для полувагона модели 12-132 с периодически повторяющимися гофрами [8], можно отметить, что коэффициент запаса усталостной прочности в зонах приварки листов обшивки к стойкам выше на 65% ($n = 1,64$) и на 33% ($n = 1,13$) для углов горизонтальных гофров.

Таким образом, применение рассматриваемого в работе варианта боковой стены кузова полувагона позволяет существенно улучшить прочностные качества кузова полувагона за счет снижения уровня напряжений в зонах их концентрации.

Помимо решения основной задачи, поставленной в работе, дополнительно выполнена оценка воздействия вибромашины на кузов полувагона. Особый интерес решение этой задачи представляет при определении параметров вибрационной машины. В зависимости от массы вибрационного устройства режим нагружения верхней обвязки полувагона может быть вибрационным или ударно-вибрационным [6]. С точки зрения сохранности ударно-вибрационный режим работы значительно сокращает ресурс кузова вагона. Не случайно в [4] предъявляются особые требования к установке и использованию вибромашин: устройства должны устанавливаться без ударов, контактирующие поверхности опорных элементов должны быть гладкими, не иметь выступающих швов и накладок и др.

Ранее в работе С.А. Другаля [10] в качестве критерия устойчивого синусоидального режима колебаний кузова полувагона установлен параметр, определяемый неравенством

$$\eta = \frac{P}{Q} < 2,2, \quad (2)$$

где P — значение вынуждающей силы;

Q — масса вибромашины;

2,2 — величина, определенная экспериментально [10] для полувагонов с высотой кузова 1880 и 2065 мм.

С целью исследования режима нагружения кузова полувагона выполнен многовариантный численный эксперимент при амплитуде вынуждающей силы 88 кН, частоте нагружения вынуждающей силой 24 Гц, длине опорных поверхностей 2,5 м, изменении массы вибромашины от 4000 до 7500 кг. По результатам численных экспериментов были получены осцил-

лограммы перемещений рамы вибромашины относительно верхней обвязки боковой стены полувагона в зависимости от массы вибромашины (рис. 7). Как видно из рис. 7, устойчивый безударный режим работы вибромашины обеспечивается при ее массе 5000 кг и более.

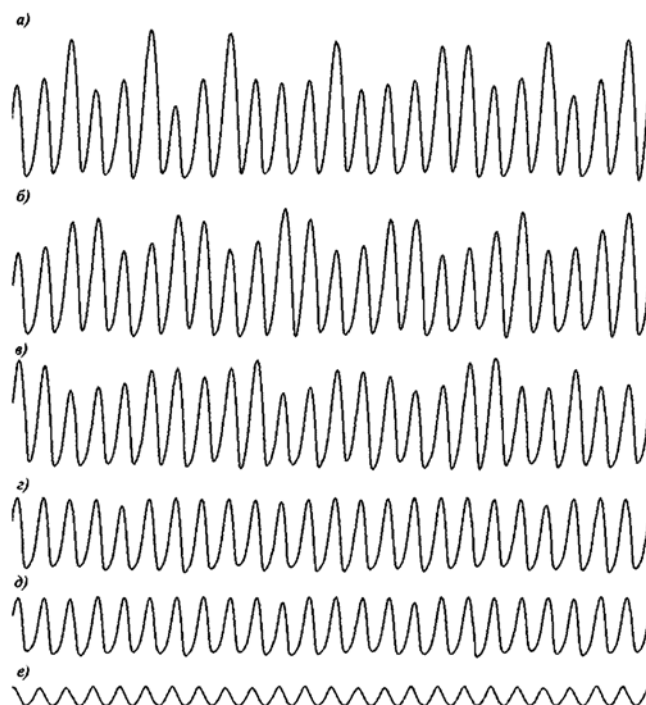


Рисунок 7 — Осциллограммы перемещений рамы вибромашины относительно верхней обвязки боковой стены полувагона в зависимости от Q :

a — $Q = 4000$ кг; b — $Q = 4200$ кг; $в$ — $Q = 4400$ кг; $г$ — $Q = 4600$ кг; $д$ — $Q = 5000$ кг; $е$ — $Q = 7500$ кг

Исходя из требований по обеспечению сохранности вагонов [6] следует, что использование накладных вибромашин с амплитудой вынуждающей силы 88 кН, длиной опорных поверхностей 2,5 м и массой вибромашины 5000 кг и более гарантирует устойчивый синусоидальный режим нагружения кузова полувагона ($\eta = 1,8$).

Таким образом, на основе выполненных в работе численных экспериментов показано, что применение в конструкции боковых стен полувагонов с профилями со сквозными гофрами и высотой кузова 2365 мм позволяет существенно снизить уровень напряжений в углах гофров и зонах приварки к стойкам, повысить коэффициент запаса усталостной прочности в зонах приварки обшивки к стойкам более чем на 65% и на 33% — для углов горизонтальных гофров. Показано, что для рассматриваемой конструкции полувагона обеспечивается выполнение требования безударного режима нагружения. Полученные результаты позволяют рекомендовать обшивку из профилей со сквозными гофрами как перспективный вариант для полувагонов с высотой кузова 2365 мм исходя из условия обеспечения сохранности при разгрузочных операциях с применением вибрационной техники.

Литература

1. Эксплуатационные испытания опытных полувагонов модели 12-132-03 на Свердловской железной дороге / Лапшин В.Ф., Сендеров Г.К., Свердлов В.Б., Черепов О.В., Поздина Е.А., Глухих А.Н. // Железнодорожный транспорт. Сер. Вагоны и вагонное хозяйство. Ремонт вагонов / ОИ/ЦНТИ ОАО «РЖД», 2006. Вып. 3 — 4. С. 30 — 39.
2. Оценка сопротивления усталости элементов кузова полувагона при воздействии накладных вибростатистических машин / Лапшин В.Ф., Колясов К.М., Свердлов В.Б., Сендеров Г.К., Глухих А.Н., Тюленев О.В., Феодоров А.Н. // Транспорт Урала, 2008. № 4. С. 53 — 58.
3. Долгих К.О., Лапшин В.Ф. Экспериментальное исследование вибронагруженности кузова полувагона // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 2. С. 44 — 50.
4. Межгосударственный стандарт ГОСТ 22235-2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. М.: Изд-во Стандартиформ, 2011.
5. Повышение ресурса обшивки боковой стены полувагона / Демин К.П., Агинских М.В., Чирков А.В., Даниленко Д.В. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сборник науч. трудов. СПб.: ПГУПС, 2009. С. 52 — 55.
6. Солодова Е.М., Шемшурова Н.Г., Локотунина Н.М. Пути улучшения потребительских свойств профиля обшивки грузового полувагона // Вестник МГТУ. 2008. № 3. С. 38 — 40.
7. ТУ 14-101-789-2008. Профили стальные высокой жесткости с периодическими повторяющимися и сквозными гофрами: технические условия / Дата введ. 01.07.2008 / ОАО «Магнитогорский металлургический завод», 2008. 26 с.
8. Долгих К.О., Лапшин В.Ф. Методика компьютерного моделирования нагруженности механической системы «вибростатистическая машина — кузов вагона — тележка» // Транспорт Урала. 2012. № 2. С. 53 — 57.
9. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходные). М.: ГосНИИВ — ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
10. Другаль С.А. Исследование параметров вибрационных погрузочно-разгрузочных машин, взаимодействующих с железнодорожными вагонами: дис. ... докт. техн. наук. Свердловск, 1973. 457 с.

References

1. Ekspluatatsionnye ispytaniya opytnykh poluvagonov modeli 12-132-03 na Sverdlovskoy zheleznoy doroge [Operational testing of experimental gondolas 12-132-03 on the Sverdlovsk Railway] / V.F.Lapshin, G.K.Senderov, V.B.Sverdlov, O.V.Cherepov, E.A.Pozdina, A.N.Glukhikh // Railway transport. Serial cars and rolling stock. Car repair. / OI/TsNTI JSC "RZD", 2006. Issue 3 — 4. P. 30 — 39.
2. Otsenka soprotivleniya ustalosti elementov kuzova poluvagona pri vozdeystvii nakladnykh vibromashin / V.F.Lapshin, K.M.Kolyasov, V.B.Sverdlov, G.K.Senderov, A.N.Glukhikh, O.V.Tyulenev, A.N.Feodorov [Evaluation of fatigue resistance of gondola body parts exposed to vibrating machines] // Transport of the Urals, 2008. No.4. S. 53– 58.
3. Dolgikh K.O., Lapshin V.F. Eksperimentalnoe issledovanie vibronagruzhennosti kuzova poluvagona [Experimental study of vibration loading of gondola body] // Vestnik transporta Povolzhya, 2012. No. 2. p. 44–50.
4. Mezghosudarstvenny standart GOST 22235-2010. Vagony gruzovye magistralnykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obschie trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovyykh rabot. [Interstate standard GOST 22235-2010. Freight cars for 1520 mm gauge main line railways - general safety requirements for cargo handling and shunting operations] M.: Publishing house Standartinform, 2011.
5. Povyshenie resursa obshivy bokovoy steny poluvagona [Improving resource of gondola side wall sheathing] / K.P.Demin, M.V.Aginskikh, A.V.Chirkov, D.V. Danilenko // Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekt [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects]: Collection of scientific works S – Pb.: PGUPS, 2009. P. 52 – 55.
6. Solodova E.M., Shemshurova N.G., Lokotunina N.M. Puti uluchsheniya potrebitelskikh svoystv profilya obshivy gruzovogo poluvagona [Ways to improve consumer properties of freight gondola sheathing profile] // Vestnik MGTU. 2008. No.3. P. 38 – 40.
7. TU 14-101-789-2008. High hardness steel profiles with periodic and cross-cutting corrugations: Specifications / Date of introduction 01.07.2008. / OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works". 2008. 26 p.
8. Dolgikh K.O., Lapshin V.F. Metodika kompyuternogo modelirovaniya nagruzhennosti mekhanicheskoy sistemy «vibromashina-kuzov vagona-telezhka» [Computer method for simulation of loads on mechanical system "vibrating machine - car body - bogie"] // Transport of the Urals. 2012. No. 2. p. 53 – 57.
9. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnye). [Standards for analysis and design of railway cars with MPS 1520 mm gauge (non-self propelled)] M.: GosNIIV – VNIIZhT, 1996. 319 p.
10. Drugal S.A. Issledovanie parametrov vibratsionnykh pogruzochno-razgruzochnykh mashin, vzaimodeystvuyushchikh s zheleznodorozhnyimi vagonami. [Investigation of parameters of vibration cargo handling machines interacting with railway cars.] Engineering DSc Thesis. Sverdlovsk, 1973. 457 p.

УДК 629.48: 65.011.8

Ольга Юрьевна Портнова, аспирант кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВАГОНАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Olga Yu. Portnova, Graduate Student of «Stations, Junctions and Freight Work» Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT). Ekaterinburg

Development And Research Of Mathematical Model Of Car Provision To Industrial Enterprises

Аннотация

Построена математическая дифференциальная модель передвижения подвижного состава по подъездным путям необщего пользования промышленного предприятия. Описание этого процесса осуществляется с помощью системы трех линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Результатами численных решений дифференциальной модели установлено, что вид кривых решения и фазового портрета определяют не только параметры системы, но и начальные условия. Найдено теоретическое обоснование эффективного управления движением вагонов на подъездных путях необщего пользования промышленного предприятия.

Ключевые слова: пути необщего пользования, промышленное предприятие, неравномерность вагонопотоков, математическая дифференциальная модель.

Abstract

The paper describes mathematical differential model of rolling stock movement via non-public access ways of industrial enterprise. The process is described using a system of three linear first-order differential equations. Numerical solutions of differential model state that the type of solution curve and phase pattern determines not only the system parameters, but also the initial conditions. The paper reveals theoretical basis of effective management of car traffic on industrial enterprise non-public access ways.

Keywords: non-public ways, industrial enterprise, uneven car traffic, mathematical differential model.

Вступление железнодорожной отрасли в третью, решающую фазу реформы, появление многочисленных субъектов транспортного рынка, стремительное развитие принципиально новых механизмов привели к тому, что традиционные, устоявшиеся схемы работы и управления не отвечают изменившимся условиям. Каждый собственник вагонов оптимизирует решение только своих локальных задач, не учитывая технические и технологические возможности инфраструктуры железных дорог. На промышленных предприятиях происходит выделение служб снабжения и сбыта в обособленные подразделения: самой компании остаются функции закупки прочих товаров, производства готовой продукции и сбыта отходов производства. На промышленных предприятиях отсутствует единый орган, координирующий всю цепь поставок сырья и порожнего подвижного состава под погрузку. Происходят количественные и качественные изменения в объемах и структуре производства:

- а) расширение и диверсификация товарного рынка;
- б) развитие специализации и кооперации;
- в) изменение технологий производства и др.

Все вышеперечисленное приводит к усложнению задач управления и планирования перевозок. Сегодня резко превышена степень неравномерности грузовых перевозок. Чем выше неравномерность грузовых перевозок, тем большими оказываются в отдельные периоды времени сгущения вагонопотоков, поездопотоков, грузопотоков и возрастает пропускная и перерабатывающая способность железнодорожной инфраструктуры [1]. В результате у публичного перевозчика при тех же мощностях значительно снижаются возможности освоения объемов народнохозяйственных грузов [2], а железнодорожные станции испытывают перегруз от сверхнормативного количества прибывшего подвижного состава с последующей парализацией работы всей станции.

В сложившихся рыночных условиях управления коэффициент двояких операций по большинству промышленных предприятий не превышает 20%, хотя может достигать 80%, что вызывает многократное увеличение объема местной работы на участках и полигонах, происходит значительный рост порожнего пробега и др.

Ниже приведены фактические данные (табл. 1 — 2) поставок порожних вагонов на подъездных путях промышленных предприятий Уральского региона для осуществления вывоза продукции, а также вагонов с сырьем в течение календарного месяца (рис. 1 — 3).

Таблица 1 — Статистические показатели движения вагонов на подъездных путях промышленного предприятия F в течение календарного месяца

Отчетные сутки	Предприятие F		
	Прибытие вагонов		Отправление вагонов груженых
	Груженых	Порожних	
1	70	53	76
2	89	36	64
3	11	32	69
4	51	50	55
5	2	85	84
6	34	12	37
7	75	77	57
8	23	99	25
9	41	61	47
10	80	40	55
11	25	37	39
12	20	38	33
13	19	88	42
14	36	59	64
15	23	69	43
16	42	27	50
17	26	46	38
18	19	43	67
19	22	53	73
20	24	48	42
21	22	74	30
22	8	34	25
23	8	99	91
24	43	49	68
25	45	46	75
26	14	78	67
27	31	106	77
28	34	78	72
29	11	31	80
30	54	51	43
31	55	16	81

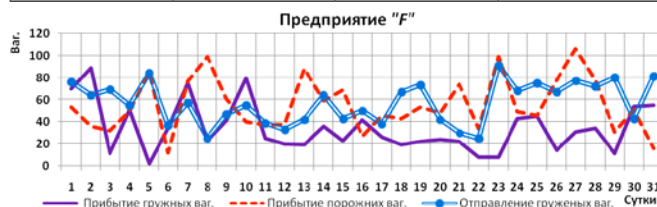


Рисунок 1 — График обеспечения вагонами промышленного предприятия F в течение календарного месяца

Анализ статистических данных на различных интервалах времени вагонопотоков предприятия F показывает скачкообразный вид амплитуды, неперiodичность и колебательный характер производственного процесса: прибытие — отгрузка — отправка вагонов. Причем наблюдаются случаи принятых управленческих решений, при реализации которых в этом процессе возникают особенности типа «катастроф»,

когда подача порожних вагонов превышает перерабатывающую способность предприятия и возникают большие простои вагонов либо их подача минимальна в некоторый промежуток времени. Следует отметить, что коэффициент сдвоенных операций по предприятию равен 3%. Учитывая масштаб анализируемого предприятия, этот показатель является малоэффективным.

Рассмотрим производственный процесс еще одного промышленного предприятия, осуществляющего свою деятельность на территории Урала. Условно обозначим его S.

Таблица 2 — Статистические показатели движения вагонов на подъездных путях промышленного предприятия S в течение календарного месяца

Отчетные сутки	Предприятие S	
	Прибытие груженых вагонов	Отправление груженых вагонов
1	79	24
2	39	15
3	100	6
4	53	33
5	67	33
6	52	27
7	73	51
8	83	18
9	30	13
10	89	39
11	63	44
12	72	37
13	47	16
14	49	59
15	45	49
16	41	37
17	45	48
18	64	35
19	26	30
20	39	19
21	37	21
22	71	45
23	95	36
24	84	40
25	75	51
26	36	49
27	79	32
28	35	46
29	99	36
30	19	56
31	58	27



Рисунок 2 — График обеспечения вагонами промышленного предприятия S в течение календарного месяца

Аналогично предприятию F статистические показатели движения вагонов на подъездных путях промышленного предприятия S в течение календарного месяца показывают скачко-

образный вид амплитуды, неперIODичность и колебательный характер производственного процесса.

Выделим объемы прибытия на подъездные пути предприятия S только сырья (лом черных металлов) и проанализируем их (см. рис. 3).

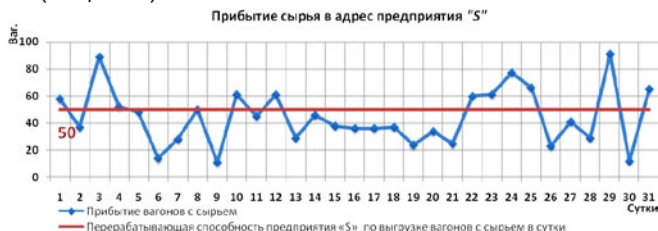


Рисунок 3 — График поставок сырья на подъездные пути промышленного предприятия S в течение календарного месяца

Прибытие сырья на предприятие S за рассматриваемый период осуществлялось без учета перерабатывающей способности подъездных путей самого предприятия и без учета перерабатывающей способности станции. Из-за неравномерного, а в отдельные периоды и сверхнормативного прибытия груженых сырьем вагонов в адрес предприятия S на железнодорожной станции и на подходах к ней неоднократно происходили скопления критического объема вагонов, создающего проблемы в организации пропуска вагонопотока для других получателей дороги на данной железнодорожной станции. В результате этого дороге приходилось вводить временные конвенционные ограничения погрузки сырья в адрес предприятия S с массовым задержанием поездов, следующих в его адрес. В существующих рыночных условиях данная ситуация стала типичной практически для всех крупных и средних промышленных предприятий сети.

Уже сегодня становится очевидным тот факт, что дальнейшая устойчивая работа отрасли требует повышения эффективности использования вагонного парка всех форм собственности. Объективно назвали радикальные перемены в системе управления перевозками на железнодорожном транспорте. Для эффективного взаимодействия железных дорог с клиентами и грузоотправителями, удовлетворения условий по срокам доставки грузов и качеству перевозок нужны новые решения. Необходимо выработать оптимальные и всесторонне проанализированные решения для организации перевозочного процесса на российских железных дорогах. Одним из основных решений назревших проблем должно стать создание системы управления, которая будет собирать информацию, учитывать интересы всех участников рынка. Таким образом, актуальность приобретает разработка методов оперативного планирования и контроля параметров вагонопотоков на пути необщего пользования, нацеленных на минимизацию времени простоя вагонов всех форм собственности (с учетом аспектов деятельности конкретного предприятия, а также железнодорожной станции, по которой осуществляются перевозки этого предприятия) и соответственно на снятие ограничений в переработке вагонов.

Цель настоящей статьи — найти аналитическое и численное решение системы трех дифференциальных уравнений первого порядка, моделирующей процесс обеспечения вагонами предприятия, а также найти теоретическое обоснование

эффективного управления движением вагонов на путях необщего пользования.

Математическое исследование транспортных потоков началось в 50-е гг. прошлого столетия. Заметим, что в 1932 г. выдающимся русским математиком С.А. Чаплыгиным издана работа «Новый метод интегрирования общего дифференциального уравнения движения поезда», в которой проведены исследования о влиянии профиля на работу железнодорожных поездов [3].

Первая в мировой литературе монография Ф. Хейта [4] по теории транспортных потоков появилась только в 1963 г. Позднее в России и за рубежом опубликованы многочисленные книги, статьи, посвященные математическому моделированию транспортных систем. Для анализа использовались методы теории вероятности и теории массового обслуживания. Для решения задачи применялись методы линейного программирования [5]. В [6] впервые разработана дорожно-сетевая модель оценки влияния неравномерности грузовых перевозок и затруднений в использовании вагонного парка отдельных железных дорог на работу других дорог сети.

В работах [7, 8] по математическому моделированию транспортных потоков предложена гидродинамическая модель с анализом понятий «распад разрыва», «волны разряжения», «ударные волны», которые являются основными в теории газовой динамики.

В настоящее время организация перевозочного процесса реализуется в соответствии с теорией транспортной науки, теорией управления транспортно-технологическими системами на транспорте и на основе принципов, выработанных многолетней практикой эксплуатационной работы.

Для поиска эффективных решений по организации грузоперевозок, в частности движения контейнеропотока, в [9] и [10] разработана имитационная модель, отображающая процесс движения контейнерных потоков в «региональной контейнерной транспортно-логистической системе» от момента поступления их на терминалы до момента отправления.

В [11] и [12] была реализована идея построения математической модели с помощью систем линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих передвижения грузовых вагонов на местах необщего пользования. Численное решение нелинейной системы двух дифференциальных уравнений первого порядка в рассматриваемой модели позволило найти некоторые закономерности управления подвижным составом на подъездных путях предприятия.

Применение математических методов, в частности математического моделирования, позволит выявить дополнительные общие и частные закономерности рационального управления перевозочным процессом.

На основе построенной дифференциальной модели передвижения подвижного состава на подъездных путях необщего пользования требуется определить параметры системы дифференциальных уравнений, соответствующие рациональному режиму перемещения вагонов. В статье будет рассматриваться данная система на одном конкретном предприятии, но при учете всех аспектов работы предприятия и станции эта система является универсальной и может быть использована для любого предприятия.

Методы решения

Используются аналитические методы теории систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка [13 — 15] и методы их решения в MathCAD 14 [16].

Математическая модель разрабатывалась на основе изучения исходной информации, установления закономерностей взаимодействия сортировочных станций и грузовых пунктов, а также участковых станций и подъездных путей предприятия.

Формирование математической модели

Пусть в некотором географическом участке находится сортировочная станция A с возможностью в соответствии с договорами и заявками осуществлять подачу/уборку подвижного состава на площадку C подъездных путей предприятия, расположенного вблизи станции A (рис. 4).

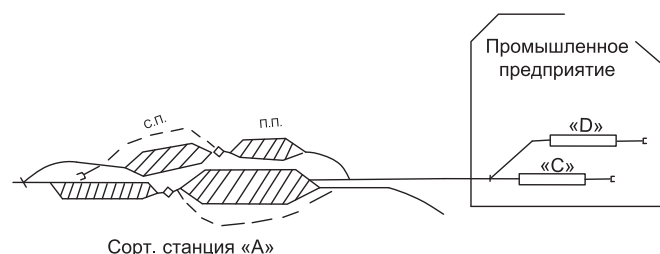


Рисунок 4 — Схема расположения сортировочной станции A и промышленного предприятия металлургического профиля

При этом на подъездных путях C может находиться определенное количество вагонов, включая вагоны, находящиеся в резерве. По определенному графику с участка C осуществляется перестановка порожних вагонов на площадку D под погрузку продукции. В соответствии с графиком погрузки и уборки груженых вагонов оформляются сопроводительные документы. После этого осуществляется уборка с подъездного пути предприятия на станцию A для дальнейшей отправки получателем. Описанный процесс является непрерывным.

Пусть в некоторый момент t на участке C находится некоторое количество $x(t)$ вагонов, поступивших на предприятие для разгрузки, и $y(t)$ порожних вагонов, а на участке D — некоторое количество $z(t)$ груженых/порожних вагонов, подготовленных к отправлению потребителям грузов и собственникам подвижного состава. Скорость изменения поступивших груженых вагонов равна $-\mu x(t)$, и в соответствии с графиком поставки груженые вагоны поступают со скоростями $f_1(t)$. На участке C происходят изменения количества вагонов со скоростью $-\alpha y(t)$, где $\alpha > 0$ за счет вывода в резерв, ремонт; перемещения порожних вагонов на участок D со скоростью, пропорциональной количеству груженых вагонов $-\beta z(t)$; поступления после разгрузки вагонов со скоростью $\gamma x(t)$, и в соответствии с графиком поставки поступают порожние вагоны со скоростью $f_2(t)$. На участке D происходит увеличение количество порожних вагонов со скоростью $\delta y(t)$, рост числа груженых вагонов со скоростью $\lambda z(t)$. На этот участок перемещают порожние вагоны из числа разгруженных со скоростью $-v x(t)$ для последующего отправления на станцию A , а затем — владельцам вагонов как неиспользованные после разгрузки. Цикл работы с вагонами завершается, груженые вагоны после оформления документов отправляются на станцию A со скоростью $f_3(t)$.

Важно, что при построении математической модели процесса обеспечения вагонами предприятий предполагается непрерывность и гладкость (непрерывная дифференцируемость) описывающих модель функций, входящих в дифференциальные уравнения системы.

В результате данного анализа распределения вагонов на подъездных путях предприятия получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= -\mu x(t) + f_1(t); \\ \frac{dy(t)}{dt} &= -\alpha y(t) - \beta z(t) + \gamma x(t) + f_2(t); \\ \frac{dz(t)}{dt} &= \delta z(t) + \lambda z(t) - v x(t) - f_3(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Числа $\alpha, \beta, \delta, \gamma, \lambda, \mu$ и v — постоянные параметры системы в виде положительных чисел, имеющих размерности соответственно 1/сут. Размерность функций $f_1(t), f_2(t)$ и $f_3(t)$ будет вагон/сут.

Будем искать решение системы (1) при заданных начальных условиях:

$$\begin{aligned} x(t)|_{t=t_0} &= x_0(t_0) = x_0; \\ y(t)|_{t=t_0} &= y_0(t_0) = y_0; \\ z(t)|_{t=t_0} &= z_0(t_0) = z_0, \end{aligned} \quad (1a)$$

где t_0 — начальное время отсчета, которое можно положить равным нулю, т. е. отсчет вести с начала цикла;

x_0, y_0 и z_0 — положительные постоянные.

Таким образом, для системы (1) сформулирована задача Коши или задача с начальными условиями. Решение будем искать для значений $x > 0, y > 0$ и $z > 0$. В данной математической модели неизвестные функции, постоянные параметры и начальные условия определяют зависимость между детерминистическими (договоры, соглашения и т. п. поставок порожних вагонов для обеспечения отгрузки производимой продукции предприятием) и функциональными (не строго регламентированными) условиями погрузки и отправки продукции потребителям. Поэтому при определении параметров $\alpha, \beta, \delta, \gamma, \lambda, \mu$ и v будем в них учитывать коэффициенты перерабатывающей способности самого предприятия.

Аналитическое решение задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (1) с начальными условиями (1a)

Первое уравнение имеет решение с учетом (1a) [14]

$$x(t) = x_0 e^{-\mu t} + e^{-\mu t} \int_0^t f_1(\tau) e^{\mu \tau} d\tau. \quad (2)$$

Обозначим правую часть (2) новой функцией $h(t)$.

Учитывая, что число груженых вагонов $x(t)$, поступивших на предприятие, ограничено, потребуем, чтобы функция $f_1(t)$ удовлетворяла неравенству

$$|f_1(t)| \leq K_1,$$

где K_1 — постоянное положительное число.

Используя последнее неравенство, получим, что для $h(t)$ справедливо неравенство

$$\begin{aligned} |h(t)| &= \left| x_0 e^{-\mu t} + e^{-\mu t} \int_0^t f_1(\tau) e^{\mu \tau} d\tau \right| \leq |x_0 e^{-\mu t}| + e^{-\mu t} \left| \int_0^t f_1(\tau) e^{\mu \tau} d\tau \right| \leq \\ &\leq x_0 + K_1 \frac{1}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \leq x_0 + K_1 \frac{1}{\mu}. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как x_0 и $e^{-\mu t}$ — положительные числа и $1 - e^{-\mu t} < 1$, обозначим $x_0 + K_1 \frac{1}{\mu} = \widetilde{K}_1$.

Окончательно получим неравенство

$$|h(t)| \leq \widetilde{K}_1. \quad (4)$$

Найденное решение $h(t)$ первого уравнения системы (1) с учетом начального условия подставим во второе и третье уравнения системы (1). Получим:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= -\alpha y(t) - \beta z(t) + \gamma h(t) + f_2(t); \\ \frac{dz}{dt} &= \delta y(t) + \lambda z(t) - \nu h(t) - f_3(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Обозначим функцию:

$$\gamma h(t) + f_2(t) = P(t)$$

и

$$\nu h(t) + f_3(t) = Q(t).$$

Тогда система (5) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= -\alpha y(t) - \beta z(t) + P(t); \\ \frac{dz}{dt} &= \delta y(t) + \lambda z(t) - Q(t). \end{aligned} \quad (6)$$

В [17] подробно рассмотрено решение системы (6), выводом которого стала система, представленная ниже,

$$y(t) = D(t) \cos \rho t + G(t) \sin \rho t;$$

$$z(t) = L(t) \cos \rho t + M(t) \sin \rho t + V(t),$$

где $D(t) = e^{-\sigma t}(y_0 + H(t))$;

$$G(t) = \frac{e^{-\sigma t}}{\rho} [(P(0) + (\sigma - \alpha)y_0 + \beta z_0) + \rho N(t)];$$

$$L(t) = \frac{e^{-\sigma t}}{\beta} [(\sigma - \alpha)(y_0 + H(t)) - H'_t - \rho \widetilde{C}_2 - \rho N(t)];$$

$$M(t) = \frac{e^{-\sigma t}}{\beta} [(\sigma - \alpha)(C_2 + N(t)) + N'_t - \rho y_0 - \rho H(t)];$$

$$V(t) = \frac{1}{\beta} P(t).$$

Рассмотрим частный случай: систему двух линейных дифференциальных уравнений (6) с постоянными значениями, где $\alpha, \lambda, \beta, \delta, P, Q$ — постоянные положительные параметры системы.

Зададим начальные условия:

$$\begin{aligned} y(t) \Big|_{t=t_0} &= y_0(t_0); \\ z(t) \Big|_{t=t_0} &= z_0(t_0). \end{aligned} \quad (7)$$

Определим стационарную точку $M(y_0; z_0)$ (точки равновесия).

Чтобы найти положение равновесия, решим систему алгебраических уравнений (для краткости записи опустим t):

$$\alpha y + \beta z = P; \quad (8)$$

$$\delta y + \lambda z = Q. \quad (9)$$

Из первого уравнения системы (3) выразим z

$$z = \frac{P - \alpha y}{\beta}. \quad (10)$$

Подставляя (10) во второе уравнение системы (9), после ряда преобразований получим линейное уравнение, решение которого имеет стандартный вид [7]

$$y_1 = \frac{\beta Q - \lambda P}{\delta \beta - \lambda \alpha}. \quad (11)$$

Итак, по (10) и (11) получены координаты (y_1, z_1) точки равновесия системы (8).

Решим задачу Коши для этой системы, т. е. найдем решение системы дифференциальных уравнений (6) с начальными условиями (7) [13]. Для системы (6) с постоянными коэффициентами получим характеристическое уравнение, которое имеет вид

$$k^2 - (\alpha - \lambda)k + \beta \delta - k\alpha = 0.$$

В соответствии с условиями поставленной задачи корни характеристического уравнения имеют вид:

$$k_1 = -\sigma + \rho i;$$

$$k_2 = -\sigma - \rho i,$$

где $\sigma > 0$; $\rho > 0$; $i^2 = -1$ мнимая единица.

Тогда решение уравнения (8) равно

$$y(t) = c_1 e^{-\sigma t} \cos \rho t + c_2 e^{-\sigma t} \sin \rho t + V, \quad (12)$$

где $V = \frac{\beta Q - \lambda P}{\beta \delta - \lambda \alpha}$ при $\beta \delta - \lambda \alpha \neq 0$.

Найдем $z(t)$:

$$z(t) = \frac{1}{\beta} [(\sigma c_1 - \rho c_2 - \alpha c_1) e^{-\sigma t} \cos \rho t + (\rho c_1 + \sigma c_2 - \alpha c_2) e^{-\sigma t} \sin \rho t] + \frac{P}{\beta} - \frac{\alpha V}{\beta}. \quad (13)$$

Вычислим неизвестные c_1 и c_2 , используя начальные условия (7), и получим окончательное решение задачи Коши для системы (1):

$$y(t) = F_1 e^{-\sigma t} \cos \rho t + G_1 e^{-\sigma t} \sin \rho t + V;$$

$$z(t) = F_2 e^{-\sigma t} \cos \rho t + G_2 e^{-\sigma t} \sin \rho t + W;$$

где

$$F_1 = c_1; G_1 = c_2; F_2 = \frac{1}{\beta} (\sigma c_1 - \rho c_2 - \alpha c_1);$$

$$G_2 = \frac{1}{\beta} (\rho c_1 + \sigma c_2 - \alpha c_2) + W; W = \frac{P}{\beta} - \frac{\alpha V}{\beta}.$$

В частности, при $\sigma = 0$ получим:

$$y = F_1 \cos \rho t + G_1 \sin \rho t + V;$$

$$z = F_2 \cos \rho t + G_2 \sin \rho t + W.$$

По теории кривых второго порядка выражение

$L = (F_1 F_2 + G_1 G_2)^2 - (F_1^2 + G_1^2)(F_2^2 + G_2^2)$ определяет вид кривой [18].

После раскрытия скобок

$$L = 2F_1 F_2 G_1 G_2 - F_1^2 G_2^2 - F_2^2 G_1^2 = -(F_1 G_2 - F_2 G_1)^2 < 0.$$

Так как $L < 0$, решение будет иметь вид эллипса, а стационарная точка будет центром. Очевидно, что при $-\sigma < 0$ стационарная точка будет устойчивым фокусом.

Численное решение задачи Коши для системы (6)

Будем искать решение задачи Коши для системы двух дифференциальных уравнений (6) с начальными условиями (7), с последующим построением их графиков при различных параметрах системы с помощью математического пакета MathCAD 14 [16].

Численные методы MathCAD 14 дали возможность изобразить кривые решения системы дифференциальных уравнений в виде функций $y(t)$ и $z(t)$, соответствующих фазовым портретам, построенным в плоскости (y, z) .

Анализ кривых решения задачи Коши системы (2), полученных в результате расчетов, показывает, что функции $y(t)$ и $z(t)$ имеют устойчивый неперiodический характер аналогично характеру периодических колебаний, известному в теории линейных колебаний. Это может означать, что колебания количества прибывающих на участок D порожних вагонов соответствует колебанию такого же количества отправляемых груженых вагонов из участка C .

Построенные на основе статистически обработанных данных обеспечения вагонами промышленного предприятия фазовые портреты соответствуют принятым параметрам системы и начальным условиям задачи. Отметим, что, варьируя каждый параметр системы или их сочетания при постоянных начальных условиях задачи, или же при постоянных параметрах системы и различных начальных условиях задачи, можно найти теоретическое обоснование эффективного управления движением вагонов на подъездных путях предприятия, т. е. требуемого обеспечения вагонов по плану работы предприятия.

Покажем это в следующих примерах.

Пример № 1. Рассмотрим частный случай, когда $\alpha = 0,2$; $\beta = 0,4$; $\delta = 0,35$; $\lambda = 0,2$; $P = 10$; $Q = 9$.

Зададим интервал интегрирования $t_0 := 0$ и $t_1 := 100$ и начальные условия $y_0 = 21$; $z_0 = 23$.

Используем для решения системы (6) с начальными условиями (7) блок Given-Odesolve пакета MathCAD 14.

Given:

$$\frac{d}{dt} y(t) = -0,2y(t) - 0,4z(t) + 10y(t_0) = 21;$$

$$\frac{d}{dt} z(t) = 0,35y(t) + 0,2z(t) - 9z(t_0) = 23;$$

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix}, t, t_1 \right].$$

Получим графики функций $y(t)$ и $z(t)$ и фазовые портреты функций $y(t)$ и $z(t)$ (рис. 5 и 6).

Пример № 2. Определим начальные условия: $\alpha = 0,2$; $\beta = 0,4$; $\delta = 0,4$; $\lambda = 0,2$; $P = 2 \sin(0,1t) + 18$; $Q = 0,9 \sin(0,1t) - 17$.

Зададим интервал интегрирования $t_0 := 0$ и $t_1 := 100$ и начальные условия $y_0 = 20$; $z_0 = 25$.

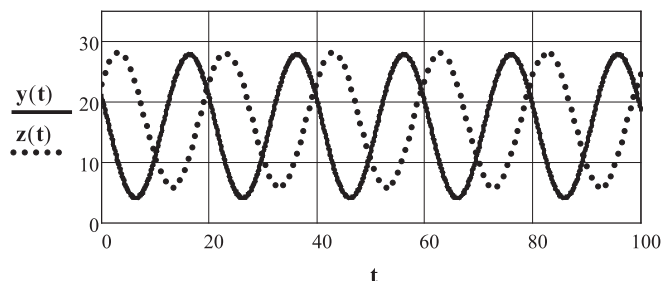


Рисунок 5 — График функций $y(t)$ и $z(t)$

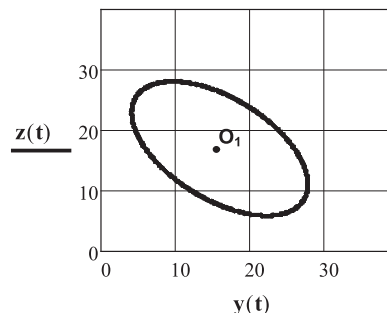


Рисунок 6 — Фазовые портреты функций $y(t)$ и $z(t)$

Используем для решения системы (6) с начальными условиями (7) блок Given-Odesolve пакета MathCAD 14.

Given:

$$\frac{d}{dt} y(t) = -0,2y(t) - 0,4z(t) + 2 \sin(0,1t) + 18y(t_0) = 20;$$

$$\frac{d}{dt} z(t) = 0,4y(t) + 0,2z(t) - 0,9 \sin(0,1t) - 17z(t_0) = 25;$$

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix}, t, t_1 \right].$$

Получим графики функций $y(t)$ и $z(t)$ и фазовые портреты функций $y(t)$ и $z(t)$ (рис. 7 и 8).

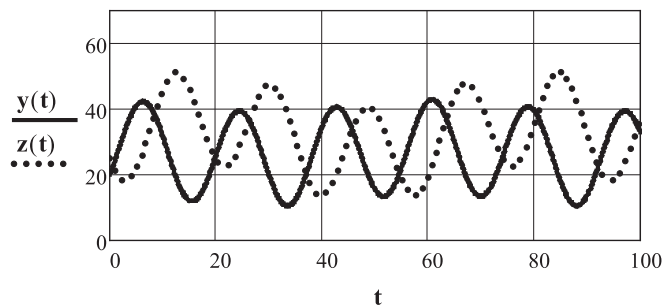


Рисунок 7 — График функций $y(t)$ и $z(t)$

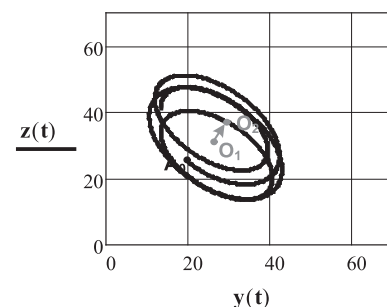


Рисунок 8 — Фазовые портреты функций $y(t)$ и $z(t)$

Пример № 3. Определим начальные условия: $\alpha = 0,2$; $\beta = 0,39$; $\delta = 0,4$; $\lambda = 0,19$; $P = 1,5 \sin^2(0,1t) + 18$; $Q = 0,8 \sin^2(0,1t) - 17$.

Зададим интервал интегрирования $t_0 := 0$ и $t_1 := 100$ и начальные условия $y_0 = 10$; $z_0 = 32$.

Используем для решения системы (6) с начальными условиями (7) блок Given-Odesolve пакета MathCAD 14.

Given:

$$\frac{d}{dt}y(t) = -0,2y(t) - 0,39z(t) + 1,5\sin^2(0,1t) + 18y(t_0) = 10;$$

$$\frac{d}{dt}z(t) = 0,4y(t) + 0,19z(t) - 0,8\sin^2(0,1t) - 17z(t_0) = 32;$$

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix}, t, t_1 \right].$$

Получим графики $y(t)$ и $z(t)$ и фазовые портреты функций $y(t)$ и $z(t)$ (рис. 9 и 10).

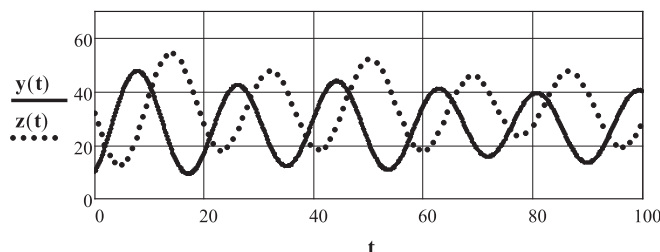


Рисунок 9 — График функций $y(t)$ и $z(t)$

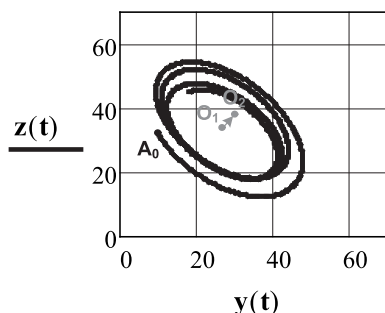


Рисунок 10 — Фазовые портреты функций $y(t)$ и $z(t)$

Кривые, построенные в примерах 1 и 2, имеющие вид эллипса, показывают, что изменение численности вагонов происходит в окрестности стационарного состояния. Отметим, что фазовые траектории, построенные в указанных примерах, вполне соответствуют ритмичной работе грузовых пунктов станций.

Таким образом, вид фазового портрета определяют не только параметры системы, но и начальные условия, хотя известно, что эти условия фиксируют одну определенную траекторию [14].

В литературе рассматривают в качестве математической модели не только линейные системы дифференциальных уравнений, но и дифференциальные модели, построенные с помощью нелинейных дифференциальных уравнений [14, 19].

Система двух нелинейных дифференциальных уравнений Вольтерра — Лотка имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dy(t)}{dt} &= \alpha y(t) - \beta z(t)y(t) + N_1; \\ \frac{dz(t)}{dt} &= \delta y(t)y(t) - \lambda z(t) - N_2. \end{aligned} \quad (14)$$

В данной системе, как и в системе (6), α , λ , β , δ , а также N_1 и N_2 — постоянные положительные параметры системы.

Численное решение системы двух нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка (14) представим с помощью MathCAD 14. Также получим не только кривую решений системы двух дифференциальных уравнений, но и фазовый портрет.

Пример № 4 (система Вольтерра — Лотка с поправками).

Определим начальные условия: $\alpha = 0,8$; $\beta = 0,5$; $\delta = 0,7$; $\lambda = 0,5$; $N_1 = 7,1$; $N_2 = 7,2$.

Зададим интервал интегрирования $t_0 := 0$ и $t_1 := 100$ и начальные условия $y_0 = 7$; $z_0 = 8$.

Используем для решения системы (6) с начальными условиями (7) блок Given-Odesolve пакета MathCAD 14.

Given:

$$\frac{d}{dt}y(t) = 0,8y(t) - 0,5y(t)z(t) + 7,1y(t_0) = 7;$$

$$\frac{d}{dt}z(t) = -0,7z(t) + 0,5y(t)z(t) - 7,2z(t_0) = 8;$$

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix}, t, t_1 \right].$$

Получим графики функций $y(t)$ и $z(t)$ и фазовые портреты функций $y(t)$ и $z(t)$ (рис. 11 и 12).

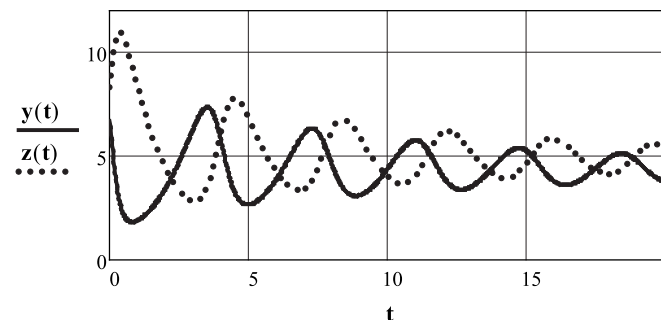


Рисунок 11 — Решение системы Вольтерра — Лотка

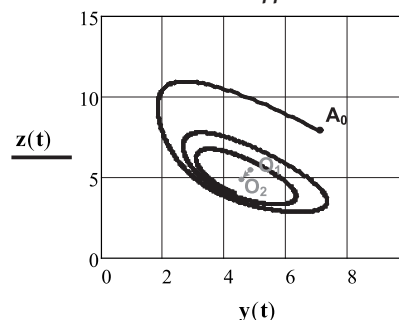


Рисунок 12 — Фазовый портрет системы Вольтерра — Лотка

Выводы

Для реализации цели исследования математической модели, описывающей передвижения вагонов на подъездных путях предприятия, получена система трех нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка и различные виды фазовых портретов этой системы решения, соответствующие различным значениям параметров системы и начальным условиям задачи.

Результатами численных решений дифференциальной модели установлено, что вид графиков и фазового портрета определяют не только параметры системы, но и начальные

условия. Кроме того, методом подбора найдены рациональные значения параметров системы, при которых вид фазовых портретов характеризуется семейством эллиптических фигур, вложенных одна в другую и описываемых вокруг центра — стационарной точки системы дифференциальных уравнений. Такой вид фазовых портретов соответствует обеспечению устойчивой работы предприятия.

Литература

1. Сотников Е.А., Шенфельд К.П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на требуемую пропускную способность участков. М.: Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 5. С. 3 — 9.
2. Шапкин И.Н., Яриков И.М., Кожанов Е.М. Эксплуатация железных дорог на рубеже веков (оптимизация, развитие, перспективы). М.: ВИНТИ РАН, 2011. 296 с.
3. Чаплыгин С.А. Избранные труды. Механика жидкости и газа. Математика. Общая механика. М.: Наука, 1976. 496 с.
4. Хэйт Ф. Математическая теория транспортных потоков. М.: Мир, 1996. 287 с.
5. Карманов В.Г. Математическое программирование. М.: Наука, 1986.
6. Бодюль В.И. Математическая модель распределения вагонного парка по железным дорогам в условиях неравномерности грузовых перевозок // Вестник ВНИИЖТ. 2006. № 3. С. 3 — 9.
7. Гасников А.В. Асимптотика по времени решения задачи о распаде «размазанного разрыва» для закона сохранения // Известия РАН. Сер. математическая. 2009. Т. 76. № 6. С. 39 — 76.
8. Гасников А.В. Асимптотическое по времени поведение решения начальной задачи Коши для закона сохранения с нелинейной дивергентной вязкостью // Труды МФТИ. 2009. Т. 1. № 4. С. 120 — 125.
9. Кочнева Д.И. Организация движения порожнего контейнеропотока в региональной контейнерной транспортно-логистической системе // Вестник УрГУПС. 2012. № 1. С. 46 — 53.
10. Кочнева Д.И. Моделирование продолжительности нахождения контейнера в региональной контейнерной транспортно-логистической системе // Вестник УрГУПС. 2012. № 3. С. 54 — 61.
11. Туранов Х.Т., Чуев Н.П. Построение дифференциальной модели движения подвижного состава на местах необщего пользования // Транспорт: наука, техника и управление. 2012. № 7. С. 13 — 18.
12. Туранов Х.Т., Чуев Н.П. Численное моделирование движения грузовых вагонов на местах необщего пользования // Наука и техника транспорта. 2012. № 3. С. 8 — 18.
13. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений. М.: Ком-книга, 2006. 472 с.
14. Эрроусмит Д., Плэйс К. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями. М.: Мир, 1986. 243 с.
15. Петровский И.Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. А.Д. Мышкиса, О.А. Олейник. М.: Изд-во МГУ, 1984. 296 с.
16. Макаров Е.Г. MathCAD 14. СПб.: Питер, 2009. 384 с.
17. Туранов Х.Т., Чуев Н.П., Портнова О.Ю. Математическое моделирование движения грузовых вагонов на подъездных путях предприятия // Транспорт: наука, техника и управление. 2013. № 1. С. 13 — 25.
18. Ефимов Н.В. Краткий курс аналитической геометрии. М.: Наука, 1967. 19. Амелькин В.В. Дифференциальные уравнения в приложениях. М.: Едиториал УРСС, 2003. 41 с.

Полученная дифференциальная модель движения грузовых вагонов может быть использована при оптимизации обеспечения вагонами промышленных предприятий.

Автор выражает безграничную признательность своему научному руководителю профессору Х.Т. Туранову и кандидату технических наук, доценту Н.П. Чуеву за внимание и поддержку.

References

1. Sotnikov E.A., Shenfeld K.P. Neravnomernost' gruzovykh perevozok v sovremennykh usloviyakh i ee vliyaniye na potrebnuyu propusknyuyu sposobnost' uchastkov. [Irregularity of freight traffic in the modern environment and its impact on the demand capacity of sections] M.: Vestnik VNIIZhT. 2011. No. 5. P. 3–9.
2. Shapkin I.N., Yarikov I.M., Kozhanov E.M. Eksploatatsiya zheleznnykh dorog na rubezhe vekov (optimizatsiya, razvitiye, perspektivy) [Railway operation at the turn of the century (optimization, development, prospects)] . M.: VINITI RAN, 2011. 296 p.
3. Chaplygin S. A. Izbrannye trudy. Mekhanika zhidkosti i gaza. Matematika. Obschaya mekhanika [Selected Works. Fluid mechanics. Mathematics. General mechanics]. M.: Nauka, 1976. 496 p.
4. Height F. Matematicheskaya teoriya transportnykh potokov [Mathematical theory of traffic flows] . M.: Mir, 1996. 287 p.
5. Karmanov V.G. Matematicheskoe programmirovaniye [Mathematical programming] . M.: Nauka, 1986.
6. Bodyul V.I. Matematicheskaya model raspredeleniya vagonnogo parka po zheleznym dorogam v usloviyakh neravnomernosti gruzovykh perevozok [Mathematical model of rolling stock distribution on railways in the context of irregular freight traffic] // Vestnik VNIIZhT. 2006. No. 3. P. 3–9.
7. Gasnikov A.V. Asimptotika po vremeni resheniya zadachi o raspade «razmazannogo razryva» dlya zakona sokhraneniya [Time asymptotics of the solution of “distributed gap” breakdown problem for conservation law] // Izvestiya RAN. Mathematical series. 2009. Vol. 76. No. 6. P. 39–76.
8. Gasnikov A.V. Asimptoticheskoe po vremeni povedeniye resheniya nachalnoy zadachi Koshi dlya zakona sokhraneniya s nelineynoy divergentnoy vyazkostyu [Time asymptotic behavior of the solution of initial Cauchy problem for conservation law with non-linear divergent viscosity] // Trudy MFTI. 2009. Vol. 1. No. 4. P. 120–125.
9. Kochneva D.I. Organizatsiya dvizheniya porozhnego konteyneropotoka v regionalnoy konteynernoy transportno-logisticheskoy sisteme [Organization of empty container traffic flow within the regional container transport and logistics system] // USURT Herald . 2012. No. 1. P. 46–53.
10. Kochneva D.I. Modelirovaniye prodolzhitelnosti nakhozheniya konteynera v regionalnoy konteynernoy transportno-logisticheskoy sisteme [Modeling the duration of container transit in regional container transport and logistics system] // USURT Herald . 2012. No. 3. P. 54–61.
11. Turanov Kh.T., Chuev N.P. Postroeniye differentsialnoy modeli dvizheniya podvijnogo sostava na mestakh neobshego polzovaniya [Creating differential motion model of rolling stock in non-public locations] // Transport: nauka, tekhnika i upravleniye. 2012. No. 7. P. 13–18.
12. Turanov Kh.T., Chuev N.P. Chislennoye modelirovaniye dvizheniya gruzovykh vagonov na mestakh neobshego polzovaniya [Numerical modeling of freight car motion in non-public locations] // Nauka i tekhnika transporta. 2012. No. 3. P. 8–18.
13. Stepanov V.V. Kurs differentsialnykh uravneniy [Course on differential equations] . M.: Komkniga, 2006. 472 p.
14. Arrowsmith D., Place K. Obyknovennyye differentsialnye uravneniya. Kachestvennaya teoriya s prilozheniyami [Common differential equations. Qualitative theory with applications] . M.: Mir, 1986. 243 p.
15. Petrovskiy I.G. Lektsii po teorii obyknovennykh differentsialnykh uravneniya [Lectures on the theory of ordinary differential equations]/edited by A.D. Myshkis, O.A. Oleynik. M.: Publishing house MGU, 1984. 296 p.
16. Makarov E.G. MathCAD 14. SPb.: Piter, 2009. 384 p.
17. Turanov Kh.T., Chuev N.P., Portnova O.Yu. Matematicheskoye modelirovaniye dvizheniya gruzovykh vagonov na podyezdnykh putyakh predpriyatiya [Mathematical modeling of freight car traffic on enterprise access ways] // Transport: nauka, tekhnika i upravleniye. 2013. No. 1. P. 13–25.
18. Efimov N.V. Kratkiy kurs analiticheskoy geometrii [Short course of analytical geometry] . M.: Nauka, 1967.

УДК 626.5:656.05:681.3

Олег Валерьевич Москвичев, кандидат экономических наук, доцент, заместитель директора Института управления и экономики СамГУПС по научной работе, Самара

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Oleg V. Moskvichev, PhD in Economics, Associate Professor, Deputy Director for Research of Institute of Management and Economics, SamGUPS

Information Technologies As A Key Factor In Providing Infrastructure Capacity

Аннотация

Рассмотрены возможности повышения эффективности управления вагонными парками России в условиях ограниченной пропускной способности инфраструктуры за счет внедрения «Единого сетевого технологического процесса железнодорожных перевозок». Проанализирован опыт железных дорог США, Европы, КНР.

Ключевые слова:

структурная реформа, СИРИУС, ЕСТП, пропускная способность, вагонный парк, инфраструктура.

Abstract

The paper addresses the question of improving the efficiency of rolling stock management on Russian railways in the context of limited infrastructure capacity and based on introduction of «Single network rail transportation process.» The experience of U.S., Europe, and China railways is examined

Keywords:

structural reform, SIRIUS, ESTP, capacity, rolling stock, infrastructure.

Многие ученые и специалисты-транспортники при анализе структурной реформы ОАО «РЖД» и при решении задачи эффективного управления вагонными парками обращаются к зарубежному опыту. Анализируя его, они выделяют в основном два варианта реформирования железнодорожной отрасли. Это опыт Европейских железных дорог и опыт Соединенных Штатов Америки.

Например, в некоторых странах Европы есть положительные примеры того, как частные предприятия эксплуатируют составы на железнодорожных путях, принадлежащих государству. В Германии частные компании эксплуатируют собственный подвижной состав с собственными локомотивами на собственной инфраструктуре.

Есть и отрицательные примеры реформирования. Так, в Великобритании после разделения отрасли на компании (по управлению инфраструктурой; по обслуживанию инфраструктуры; владеющие подвижным составом; непосредственно осуществляющие перевозки) нарушилась координация и взаимосвязь между участниками перевозочного процесса, резко возросло число крупных аварий с человеческими жертвами, что привело к банкротству компании, владеющей инфраструктурой.

Если в большинстве европейских стран в основе реформирования произошло разделение инфраструктуры и перевозочной работы, то в США и Канаде пошли по пути разделения на компании, владеющие как своей инфраструктурой, так и собственным подвижным составом. Однако создание нескольких компаний, ведущих в буквальном смысле параллельную конкуренцию, оказалось возможным из-за развитой инфраструктуры, т. е. во многих направлениях имеются параллельные пути сообщения, принадлежащие разным компаниям, или альтернативные маршруты следования. Например, железные дороги США при сопоставимом с железными дорогами России грузооборотом имеют эксплуатационную длину (протяженность) в 2,7 раза выше (231,2 тыс. км против 85,2 тыс. км) [1].

Еще одним положительным, влияющим на управление вагонными парками за рубежом, некоторые специалисты называют преобладание специализированного подвижного состава над универсальным. Так, подвижной состав этих компаний якобы был приобретен под конкретные перевозки и конкретные потребности, поэтому вагоны передвигаются в основном

от одной и той же станции погрузки до станции выгрузки, а в некоторых случаях еще и по своим путям.

Однако при детальном анализе оказывается, что так не во всех странах.

Например, в США, действительно, в 2010 г. в структуре общего парка транспортных компаний 65% составляли специализированные грузовые вагоны и только 35% приходилось на долю универсальных вагонов (крытые вагоны, полувагоны и платформы).

В Европе по состоянию на 2010 г. насчитывалось 460 тыс. грузовых вагонов, причем около 60% из них специализированных. Протяженность железнодорожной сети Европы более 150 000 км.

Данные о структуре грузовых вагонов транспортных компаний США представлены в табл. 1 и на рис. 1 [2].

Таблица 1 — Структура парка грузовых вагонов транспортных компаний США, тыс. ваг.

Тип вагона	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	%
Крытый вагон	134,33	133,88	132,15	121,57	114,28	103,90	7,6
Полувагон	201,23	203,57	213,72	217,78	220,24	215,61	15,8
Вагон-хоппер	143,25	150,51	164,38	166,42	168,34	167,52	12,3
Крытый вагон-хоппер	377,05	382,78	395,84	411,50	414,42	409,56	30,0
Платформа	158,79	168,13	171,48	172,24	170,19	163,03	12,0
Рефрижераторный вагон	24,20	24,32	23,49	22,09	18,83	17,10	1,3
Цистерна	243,63	248,08	255,11	269,07	281,43	281,92	20,7
Прочие	5,34	5,24	5,07	5,03	5,24	4,79	0,4
Итого	1287,92	1316,52	1361,25	1385	1392	1363,43	100

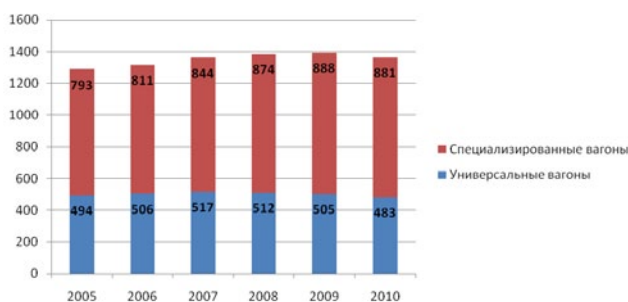


Рисунок 1 — Парк грузовых вагонов США, тыс. ваг.

В Китае ситуация с вагонными парками обратная. Так, в 2009 г. в структуре общего парка транспортных компаний КНР 90% грузовых вагонов составляли универсальные и только 10% приходилось на долю специализированного подвижного состава (протяженность железнодорожных грузовых магистралей 93 300 км).

Данные о структуре грузовых вагонов транспортных компаний КНР представлены в табл. 2 и на рис. 2 [2].

Парк грузовых вагонов в России в 2010 г. насчитывал 1 017 000 вагонов, в 2011-м — 1 081 000, в 2012-м, по некоторым данным, приблизился к отметке 1 200 000 вагонов.

Структура вагонного парка РФ представлена в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 2 — Структура парка грузовых вагонов транспортных компаний КНР, тыс. ваг.

Тип вагона	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	%	2010 г.
Крытый вагон	99	99	102	103	103	17,3	-
Полувагон	343	360	366	379	388	65,3	-
Платформа	30	32	36	37	39	6,6	-
Цистерна для опасных грузов	3	2	2	2	2	0,3	-
Цистерна	38	35	34	33	32	5,4	-
Рефрижераторный вагон	7	7	7	7	7	1,2	-
Прочие	21	21	22	23	23	3,9	-
Итого	542	558	571	585	594		622

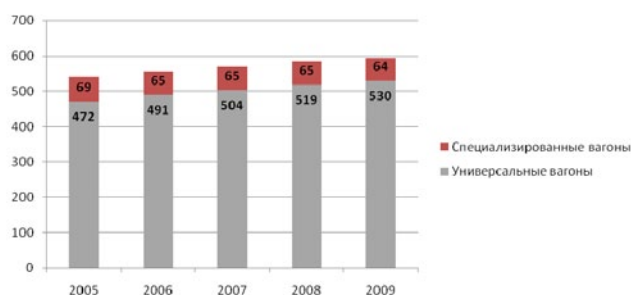


Рисунок 2 — Парк грузовых вагонов КНР, тыс. ваг.

Таблица 3 — Структура парка грузовых вагонов России, тыс. ваг.

Тип вагонов	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.
Полувагоны	344,3	368	410	473
Платформы	66,7	66	65	56
Крытые	87,6	75	76	71
Итого универсальных вагонов	499	509	551	600
Цистерны	234,4	240,4	249,5	265,5
Прочие	242,5	236	216	215
Итого специализированных вагонов	477	476,4	465,5	480,5
Итого	976	985,4	1016,5	1080,5

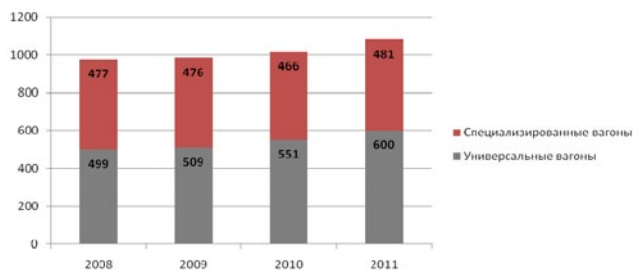


Рисунок 3 — Парк грузовых вагонов РФ, тыс. ваг.

На сегодняшний день доля универсального и специализированного подвижного состава на российских железных дорогах примерно одинаковая: 55% вагонного парка — это универсальный подвижной состав, 45% — специализированные вагоны.

Данные о протяженности грузовых железнодорожных магистралей, количеству и роду подвижного состава приведены в табл. 4 [2].

Если рассматривать долю универсального подвижного состава, то она максимальна в Китае — около 90% грузовых вагонов универсальные. В Европе и США универсальные вагоны составляют третью часть вагонного парка, в России — половину всех грузовых вагонов.

Таблица 4 — Протяженность железнодорожных линий и структура вагонного парка в регионах мира в 2010 г.

Страна	Число универсальных вагонов	Число специализированных вагонов	Общее число вагонов	Доля универсальных вагонов, %	Протяженность ж. д. магистралей, км	Число вагонов на 1 км пути, ваг/км
США	483 000	881 000	1 364 000	35	225 000	6,1
Россия	551 000	466 000	1 017 000	55	85 200	11,9
Китай	530 000	64 000	594 000	90	93 300	6,4
Европа	184 000	276 000	460 000	40	150 000	3,1
Германия	46 100	79 500	125 600	37	33 576	3,7

Структура вагонного парка в регионах мира в 2010 г. представлена на рис. 4.

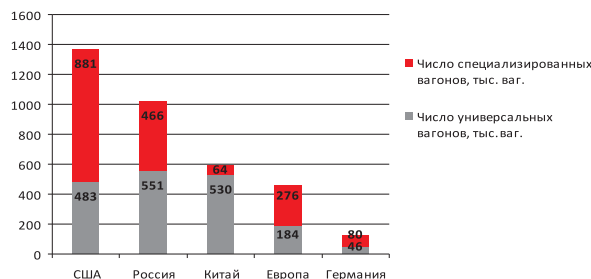


Рисунок 4 — Структура вагонного парка в регионах мира в 2010 г.

Если рассмотреть парк грузовых вагонов относительно развития путей сообщения, то можно отметить, что в России на 1 км пути приходится более 11 вагонов, в то время как в США этот показатель меньше в 2 раза, а в Европе — в 4 раза (рис. 5).

Рассмотрев зарубежный опыт, можно сказать, что на железных дорогах Европы и США решалась задача оптимизации управления вагонными парками, связанная в основном с получением максимальной прибыли от эксплуатации подвижного состава.



Рисунок 5 — Число грузовых вагонов, приходящихся на 1 км ж. д. пути в 2010 г.

Причем в этих странах никогда не стояло проблемы по управлению вагонными парками, связанной с нехваткой пропускных способностей линий и перерабатывающей способностью станций. И это в первую очередь объясняется избыточной провозной и перерабатывающей мощностью инфраструктуры.

Из табл. 4 видно, что многие страны обладают гораздо меньшим количеством подвижного состава и более развитой сетью железнодорожных линий, кроме того, в структуре вагонного парка почти во всех странах, кроме КНР, преобладает специализированный подвижной состав.

Что же касается российских железных дорог, то были выявлены следующие основные факторы, препятствующие эффективному управлению вагонным парком в условиях множественности операторов (рис. 6).

Анализируя представленные факторы и рассмотренный выше опыт, можно сделать вывод, что ситуация на железных дорогах США, Европы и КНР не похожа на ту, что сложилась на российских железных дорогах, и невозможно найти готовый рецепт успеха.

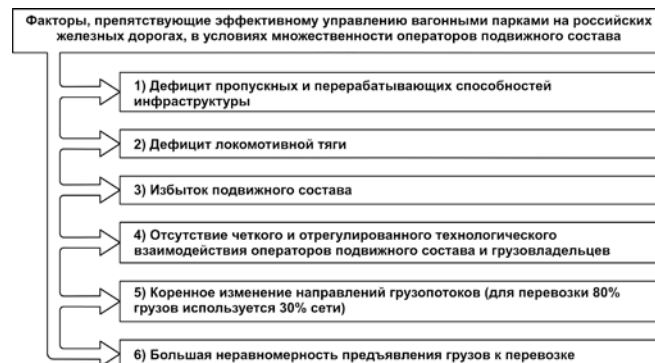


Рисунок 6 — Факторы, препятствующие эффективному управлению вагонными парками на российских железных дорогах, в условиях множественности операторов подвижного состава

Обращая внимание на пример дробления целостного механизма железнодорожной отрасли в Великобритании, можно считать своевременным и жизненно необходимым введение в действие «Единого сетевого технологического процесса железнодорожных перевозок» (ЕСТП), который должен стать гарантом нормативно-технологического обеспечения организации и управления железнодорожными грузовыми перевозками и организации системного взаимодействия участников перевозочного процесса в эффективном использовании ресурсов [3].

В техническом плане и на дальнейшую перспективу для решения задачи эффективного управления вагонным парком в условиях множественности операторов и ограниченности пропускных способностей железнодорожных линий необходимо прежде всего создать достаточный эксплуатационный резерв пропускных, провозных и перерабатывающих способностей объектов инфраструктуры сети, а в технологическом — интегрировать в единый сетевой технологический процесс железнодорожных перевозок информационные технологии, которые помогут рационально использовать пропускную способность существующей инфраструктуры.

Информационные технологии на современном этапе — это не просто средство поддержки управления, а основной элемент инфраструктуры, позволяющий повысить эффективность использования подвижного состава при минимальных затратах и повышении производительности труда работников железнодорожного транспорта.

Информационные технологии уже стали бизнес-образующим фактором для железнодорожного транспорта и во многом определяют эффективность его работы.

При рассмотрении ЕСТП необходимо отметить, что там существует даже раздел «Информационное обеспечение единого сетевого технологического процесса перевозок», где отмечены те задачи, которые должны решаться АСУЖТ. Кроме того, говорится о необходимости оценки инфраструктурных возможностей и моделировании хода перевозочного процесса на сетевом уровне при помощи информационных технологий. Но в данном разделе не прослеживается единой технологии взаимодействия и зоны ответственности информационно-управляющих систем, они не построены в единую технологическую цепочку, лишь кратко затронут вопрос о роли АС ЭТРАН в едином технологическом процессе.

В ЕСТП следовало поставить задачу интеграции в единую систему информационно-управляющих систем, используемых на железнодорожном транспорте, так как в настоящий момент их насчитывается около двух десятков с дублирующими функциями и информацией. На рабочем месте одного пользователя бывает установлено три-четыре, а иногда и более автомати-

зированных систем управления и АРМов, что, в свою очередь, не способствует повышению эффективности управления перевозочным процессом. Это объясняется тем, что в большинстве случаев уровень знания пользователей о возможностях системы и использовании их функциональности сводится к получению справочной информации. Также во многих системах не реализованы функции, заявленные разработчиками, при внедрении этих систем в эксплуатацию, поэтому часто информационно-управляющие по своей сути системы являются справочными.

Для решения подобных задач была создана система СИРИУС (Сетевая интегрированная российская информационно-управляющая система) — комплекс, объединяющий информационные технологии управления перевозками в единое целое (рис. 7). Система создана на принципах, реализуемых на современной программно-технической базе, и рассматривается как корпоративная и интегральная. Первое означает, что она формируется по одним и тем же правилам для однородных объектов (станции, железные дороги, ОАО «РЖД»), распределенных как по вертикали, так и по горизонтали управления. Второе свойство — интегральность — заключается в функционировании системы на основе единой информационной базы, предусматривающей идентичность представления информации об объектах в серверах различных уровней управления, а также использование единых источников сбора и обработки данных [4].

Как заявлено разработчиками, система позволяет управлять вагонным парком, погрузочными ресурсами и грузопото-

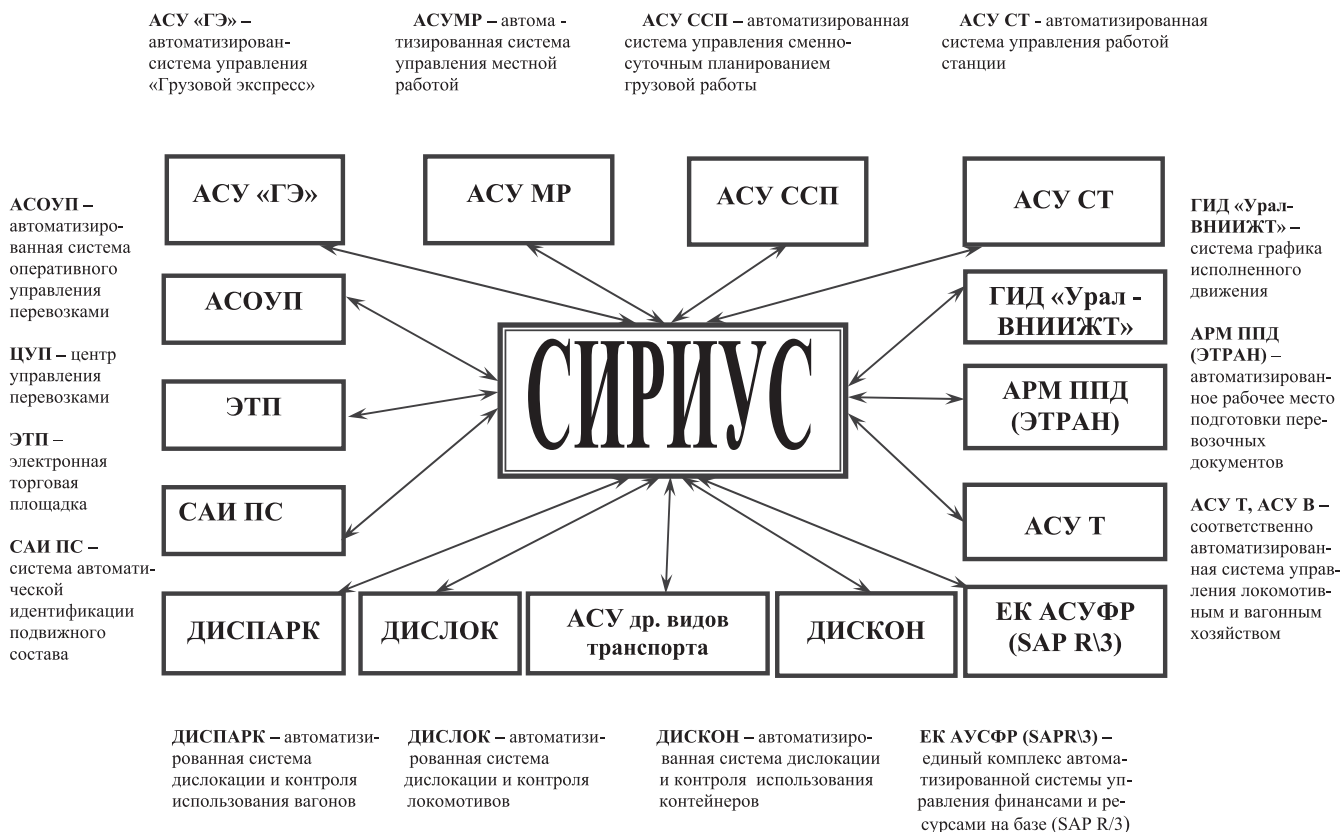


Рисунок 7 — Сетевая интегрированная российская информационно-управляющая система

ками, организовывать продвижение поездов в оптимальном режиме с учетом всех многообразных факторов поездной обстановки, складывающейся на всем пути продвижения груза.

СИРИУС содержит планирующие и прогнозные модели, имеет централизованную нормативную базу данных по всем показателям эксплуатационной работы сети, дорог, станций, экономические оценки эффективности перевозочного процесса в целом и его частей.

В основу планирования и регулирования грузопотоков положен метод ситуационного моделирования взаимосвязанных между собой объектов управления. Он универсален и, по заявлению разработчиков, может быть применен для любых объектов и одновременно учитывает сложившуюся ситуацию в реальном времени [5]:

- наличие на сети, дорогах, станциях погрузочных ресурсов, грузов, заявок, вагонов, поездов, локомотивов и бригад и т. д.;
- положение на местах погрузки (зарождение вагоно-, грузо- и поездопотоков);
- темпы продвижения транспортных и грузовых потоков, подвода порожних вагонов к местам погрузки и груженых к местам выгрузки или перевалки, темпы выгрузки.

При установившемся ритме работы все эти составляющие сбалансированы. В случае нарушения баланса по заданным критериям отклонений в ситуационной модели определяется конкретный момент, когда необходимо принятие управляющих решений, причем все происходит в режиме реального времени.

Кроме того, в системе было введено понятие «ресурсы объекта управления». Любой объект управления — станция, путь необщего пользования, диспетчерский участок, отделение или дорога — в зависимости от ситуации имеет ресурс, т. е. нормированную загрузку, вместимость. В соответствии с конкретной ситуацией увеличение загрузки и снижение ресурса приводит к уменьшению маневренности на объекте управления. Это может быть необеспечение подач, замедление продвижения или «бросание» поездов и т. д. В СИРИУСе определяются контрольные, допустимые точки отклонений от заданных нормативов, при достижении которых необходимо упреждающее принятие мер не только на данном объекте управления, но и на всех взаимосвязанных с ним [5].

В этих целях система СИРИУС при организации планирования и управления эксплуатационной работой использует долгосрочные и среднесрочные маркетинговые прогнозы, представленные в виде грузопотоков, которые готовит система фирменного транспортного обслуживания (СФТО).

На основе бизнес-прогнозов по объемам и видам перевозок и принятых от клиентов заявок на перевозку грузов СФТО формирует сводный план перевозок с включением в него всех отдельных заявок. Задача СИРИУСа — минимизировать расходы.

СИРИУС на основе сводного плана рассчитывает технические нормы эксплуатационной работы и обеспечивает выполнение сводного плана через механизм исполнения каждой согласованной заявки на перевозку, включая импорт и транзит через территорию России.

При поступлении и согласовании заявки на перевозку грузов система СИРИУС, используя нормативные и расчетные сроки доставки грузов в пункты назначения (сдачи), формирует на основе данных заявки календарные сроки прибытия и выгрузки вагонов.

Наряду с этим решается оптимизационная задача привязки-регулировки порожних вагонов из-под предстоящей выгрузки к пункту назначения для предстоящей погрузки. В первую очередь оптимизируются отдельные или комплексные критерии по стоимости с учетом возврата вагонов собственникам, запаса пробега до пункта погрузки и пункта последующего ремонта, минимизации суммарного оборота вагона и порожнего пробега на выполнение заявленных корреспонденций перевозимых грузов, приоритетности выполнения ритмичного либо согласованного подвода грузов в пункты назначения, использования резерва подвижного состава при сбоех в процессе выполнения плана перевозок и заявок.

Адаптация данной системы к современным условиям и интеграция в единый сетевой технологический процесс работы железнодорожного транспорта будет способствовать решению обозначенных проблем и способствовать оптимизации управления перевозочным процессом на основе современных информационных технологий. СИРИУС сможет стать единой корпоративной системой управления на российских железных дорогах.

Литература

1. Хусаинов Ф.И. *Экономические реформы на железнодорожном транспорте: монография.* М.: Наука, 2012. 192 с.
2. *Rolling Stock: Locomotives and Rail Cars. Publication ITS-08, March 2011.* 128 p.
3. *Единый сетевой технологический процесс железнодорожных грузовых перевозок.* М.: ОАО «РЖД», 2013. 119 с.
4. Варгунин В.И., Москвичев О.В. *Информационные технологии и автоматизированные системы управления на железнодорожном транспорте: учебное пособие для вузов ж. д. транспорта.* Самара: СамГАПС, 2007. 234 с.
5. Зябиров Х.Ш., Слободенюк Н.Ф. «Сириус». *Единая сетевая интегрированная система // Железнодорожный транспорт.* 2003. № 8.

References

1. Khusainov F.I. *Ekonomichekie reformy na zheleznodorozhnom transporte. [Economic reforms in railway transport.] Monograph.* M.: Nauka, 2012. 192 p.
2. *Rolling Stock: Locomotives and Rail Cars. Publication ITS-08, March 2011.* 128p.
3. *Ediny setevoy tekhnologicheskij protsess zheleznodorozhnykh gruzovykh perevozok. [Single network process of rail freight transportation]* Moskva: OAO «RZhD», 2013. 119 p.
4. Vargunin V.I., Moskvichev O.V. *Informatsionnye tekhnologii i avtomatizirovannye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte: [Information technologies and automation control systems in rail transport]: textbook for railroad transport universities.* Samara: SamGAPS, 2007. 234 p.
5. Zyabirov Kh.Sh., Slobodenyuk N.F. «Sirius». *Edinaya setevaya integrirovannaya sistema ["Sirius." Single integrated network system] // Zheleznodorozhny transport.* 2003. No. 8.

УДК 656.212.5

Елена Николаевна Тимухина, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Джамиль Рестамонович Зартдинов, инженер кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЭКСПЕРТИЗА — ИНСТРУМЕНТ ПРИ ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Elena N. Timukhina, DSc in Engineering, Associate Professor, Head of «Management of Exploitation Work» Chair, USURT,
Dzhamil R. Zartdinov, Engineer of «Management of Exploitation Work» Chair, USURT

Automated Examination — A Tool For Evaluation Of Transportation Process Safety

Аннотация

Транспортные объекты со сложной структурой, такие как железнодорожные станции и транспортные узлы, транспортные структуры городов, аэропорты, не поддаются строгой формализации, и параметры их работы невозможно рассчитать по аналитическим формулам. Поэтому необходимо использовать метод имитационной экспертизы для исследования работы проектируемых объектов посредством проведения экспериментов на модели и делать комплексную оценку полученных результатов.

Ключевые слова: имитационная экспертиза, имитационная модель, ИСТРА, развитие станции, транспортный процесс.

Abstract

Transport facilities with complex structures, such as railway stations and transport hubs, transport structures of cities, airports cannot be characterized formally in all details and their operating parameters cannot be calculated by analytic formulae. So simulation examination shall be used to study operation of designed facilities through experiments on a model, and comprehensive assessment of the results shall be performed.

Keywords: simulation expertise, simulation model, ISTRA, station development, transport process.

Безопасность движения поездов — основное условие эксплуатации железных дорог, перевозок пассажиров и грузов. Все организационные и технические мероприятия на железнодорожном транспорте должны отвечать требованиям безопасного и бесперебойного движения поездов. Безопасность движения обеспечивается содержанием в постоянной исправности всех железнодорожных сооружений (путь, подвижной состав, оборудование и механизмы, устройства СЦБ и связи). Повышение интенсивности движения поездов, увеличение их скорости и массы предъявляют жесткие требования к качеству и надежности средств обеспечения безопасности движения. Прежде всего это относится к устройствам автоматических и полуавтоматических систем управления движением поездов на перегонах, станциях и переездах: автоматической блокировки, автоматической локомотивной сигнализации, полуавтоматической блокировки, электрической централизации и т. д. Не меньшее значение в обеспечении безопасности имеет деятельность персонала железных дорог, непосредственно участвующего в реализации движения поездов (машинисты, дежурные по станции, поездные диспетчеры и т. д.). От их профессиональной подготовленности, опыта, способности быстро ориентироваться и принимать правильные решения в сложных ситуациях зависит не только четкая реализация, но и, главное, безопасность и надежность всего перевозочного процесса [1].

К настоящему времени разработана мощная система моделирования ИСТРА, которая позволяет рассчитывать технические и технологические параметры систем железнодорожного и других видов транспорта. Кроме исчерпывающего набора количественных и качественных показателей работы, система ИСТРА выявляет узкие места структуры и технологии, на основе которых определяются уязвимые элементы инфраструктуры, создающие наибольшую опасность, особенно в условиях интенсивной переработки вагонопотоков.

Уменьшение интенсивности опасных отказов технических средств достигается путем создания необходимых запасов прочности на этапе проектирования при имитационном моделировании и последующего восполнения этих запасов в про-

73

Январь – Март

цессе эксплуатации. При увеличении запаса прочности технических средств одновременно повышается их надежность и в целом безопасность выполняемых процессов.

Функциональная надежность устройств и безопасность выполняемых работ определяются 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 в технологии и значительные резервы элементов системы. Поэтому степень согласованности инфраструктуры и технологического процесса влияет на эксплуатационную надежность железнодорожных станций. Таким образом, при правильной организации технологии и развитой адаптации вероятность невыполнения функции снижается с увеличением структурного технологического уровня (рис. 1). Соответственно повышается функциональная надежность и безопасность [2].

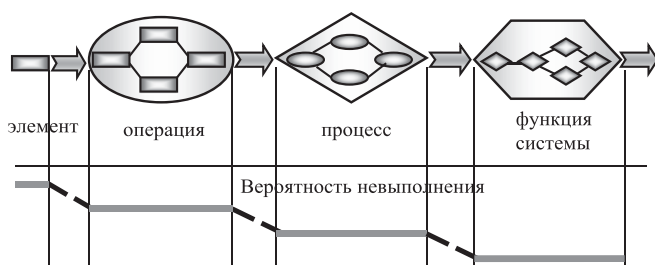


Рисунок 1 — Соотношение вероятности невыполнения функции в элементах и подсистемах транспортной системы

На крупных станциях комплекс элементов объединен в единое целое сложной сетевой структурой, включающей большое количество стрелок. Характер процессов взаимодействия меняется из-за возникающих задержек. На пропускную способность горловин станций влияет множество факторов. Процессы взаимодействия невозможно описать формально, поэтому единственным рациональным методом расчета станций является имитационное моделирование. Различные схемные решения в проектах развития станций должны проходить проверку с точки зрения технологии. После наложения технологии, наполнения потоками, которые надо переработать и пропустить, оценив параметры работы станции, схема становится проектом. Оценить уровень надежности и безопасности транспортных процессов можно с помощью процедуры «имитационная экспертиза» [2, 3].

На примере имитационной системы ИСТРА предлагается осуществлять имитационную экспертизу проектов. Подсистема САПР берет на себя подготовку свыше 90% исходной информации. Избежать полного перебора вариантов позволяет метод ускорения процесса оптимизации — «имитационный спуск» [4, 5].

Результаты моделирования могут стать основой для совершенствования структуры и технологии объекта с целью минимизации как технологических, так и структурных задержек, что показано на примере выполненной имитационной экспертизы при оценке проектов развития четной системы станции Ч—Г¹.

¹ Здесь и далее буквами обозначены парки станций, прилегающие направления и железные дороги.

Станция Ч—Г входит в разряд крупнейших сортировочных станций, контролируемых ОАО «РЖД». Это двусторонняя сортировочная станция сетевого значения, имеющая классическую структуру и организацию работы. Станция реализует различные технологические линии, такие как организация пригородного и пассажирского движения, грузовые операции и т. д.

Четная система состоит из трех последовательно расположенных парков: парка приема, парка формирования и парка отправления. Между парком приема и парком формирования находится автоматизированная горка большой мощности. Основное назначение системы — переработка вагонопотока, поступающего с направлений Зл и Тр; формирование и отправление поездов на железные дороги Св и З-С (такие направления, как Ку, К-У, Уф; всего 18 назначений).

Проектирование сортировочных устройств на отечественных железных дорогах осуществляется на основе «Правил и норм проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм» [6].

Число сортировочных путей на сортировочных станциях устанавливается в зависимости от числа назначений по плану формирования поездов (включая назначения порожних вагонов), суточного числа вагонов каждого назначения и технологии работы по формированию поездов. На каждое назначение плана формирования выделяется, как правило, отдельный сортировочный путь. При суточном вагонопотоке более 200 вагонов для назначений выделяется два пути [6].

В настоящее время на станции Ч—Г для накопления и формирования поездов на такие назначения, как Ин, Ме, Су, выделено по одному пути, но суточный вагонопоток по этим назначениям превышает 200 вагонов, что говорит о необходимости выделения дополнительных путей по данным назначениям. В соответствии с правилами и нормами проектирования [6], потребное количество путей в сортировочном парке 35 (вместо 32 имеющихся).

Также существует восемь путей 21 — 26, 31, 32 (рис. 2), вмещающих 45 — 55 условных вагонов, и это не позволяет использовать принцип скользящей специализации. Поэтому формирование составов поездов осуществляется с двух-трех путей, что приводит к длительной занятости одной вытяжки формирования.

Еще одно узкое место в работе парка формирования — ограниченность путевого развития вагонного депо. Это приводит к занятости четырех сортировочных путей 21 — 24 (см. рис. 2) в парке формирования и одного пути в парке приема вагонами для выполнения безотцепочного, текущего отцепочного и депоовского ремонтов.

Дополнительные ограничения на пропускную способность станции накладывает несовершенство горловины сортировочного парка формирования со стороны вытяжных путей, где с 13 путей 52 — 56, 61 — 68 (см. рис. 2) отсутствует возможность параллельного выставления поездов в парк отправления (рис. 3), а на данных путях формируется до 42% от общего количества формируемых составов.

Более того, пути 12 — 15 парка отправления (рис. 4) используются для обработки транзитных поездов четного направления, поэтому фактически 20 путей объединяются одним стрелочным переводом 506. Как следствие, несвоевременное

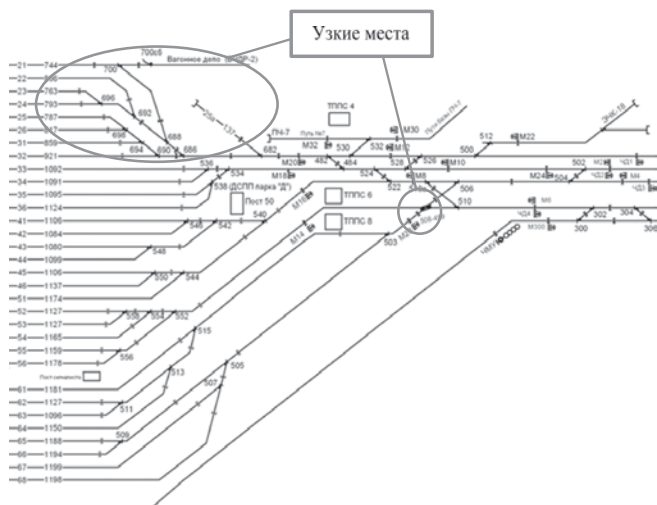


Рисунок 2 — Восточная горловина парка Д

Наибольшие задержки вызваны из-за следующих устройств:

Устройство	Задержки
Лок. Формирования	68:42
Стр. 730,756,772,796,802,804,806,820,830	11:50
Стр. 307,311,321,331,337,349,365	07:20
Стр. 503,505,507,508,509,510,511,513,515,552,554,556,558	07:01
Стр. 506,510а,522,540,542,544,546,548,550	06:57

Рисунок 3 — Узкие места структуры

формирование и перестановка поездов в парк отправления В (рис. 5) ведет к увеличению вагоно-часов простоя на станции. Данная проблема существует с момента ввода в эксплуатацию шестого пучка парка Д.

По результатам многочисленных экспериментов на модели получено подтверждение тому, что горловина парка формирования, занятая на формировании и перестановке составов, имеет существенный недостаток в части отсутствия параллельности их выполнения (см. рис. 4).

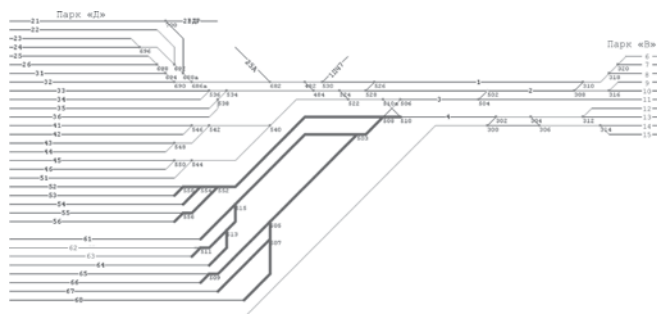


Рисунок 4 — Группа стрелок с высокой занятостью (ст. 4—Г)

Использование имитационной модели позволяет в автоматическом режиме получать суточный план-график, который подтверждает дисгармонию между структурой и технологией. Одной из причин этого служит отсутствие вытяжных путей для выполнения операций по окончании формирования поездов в парке Д (см. рис. 5).

В отдельные периоды задержки настолько велики, что происходит сбой в работе сортировочной горки (рис. 6). Однако,

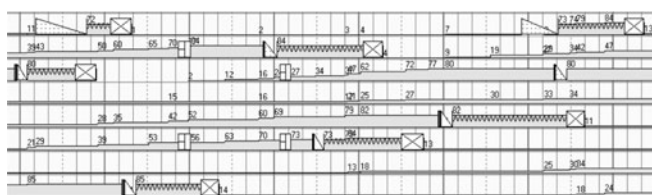


Рисунок 5 — Работа парка Д при несвоевременном формировании поездов

учитывая большую емкость путевого развития парка приема, задержек поездов на подходе к станции в настоящее время не возникает. При существующих размерах движения указанный недостаток негативно влияет только на простой вагонов на самой станции.



Рисунок 6 — Работа парка Г при сбое на сортировочной горке

Таким образом, устранять несовершенство инфраструктуры сортировочного парка необходимо уже сегодня, поскольку с ростом объемов перевозок это негативно отразится не только на технологии работы станции и узла, но и на безопасности выполнения технологических операций в целом.

На данном этапе предлагаются конкретные пути решения:

- пересмотр плана формирования;
- реконструкция сортировочного парка Д.

Переустанавливать восточную горловину сортировочного парка необходимо одновременно с модернизацией электрической централизации (ЭЦ) для обеспечения параллельного выставления составов в парк отправления. Появляется возможность: а) производить маневровую работу по всем вытяжным путям одновременно; б) отправлять поезда параллельным методом из парка отправления. Более того, возникает изоляция сортировочных путей от путей парка отправления, специализированных для приема транзитных поездов. В настоящее время при приеме транзитных поездов на пути 12 и 13 парка отправления требуется перевод стрелок 506/508 «по съезду» (см. рис. 4).

Вопрос недостатка путей парка формирования можно решить, построив дополнительный пучок из шести путей 11 — 16 (рис. 7). В результате строительства емкость сортировочного парка увеличится на 16,5%, или на 393 вагона. Это позволит дублировать мощные назначения в левой и правой его части.

После реконструкции предполагается внедрение жесткой специализации путей сортировочного парка формирования и парка отправления для совмещения операций по формированию и отправлению поездов. Предлагается также пересмотреть план формирования. Весь четный транзитный поток направить через транзитную станцию Ч—Ю (рис. 8). Таким образом, с Ч—Г будут отправляться поезда только своего формирования.

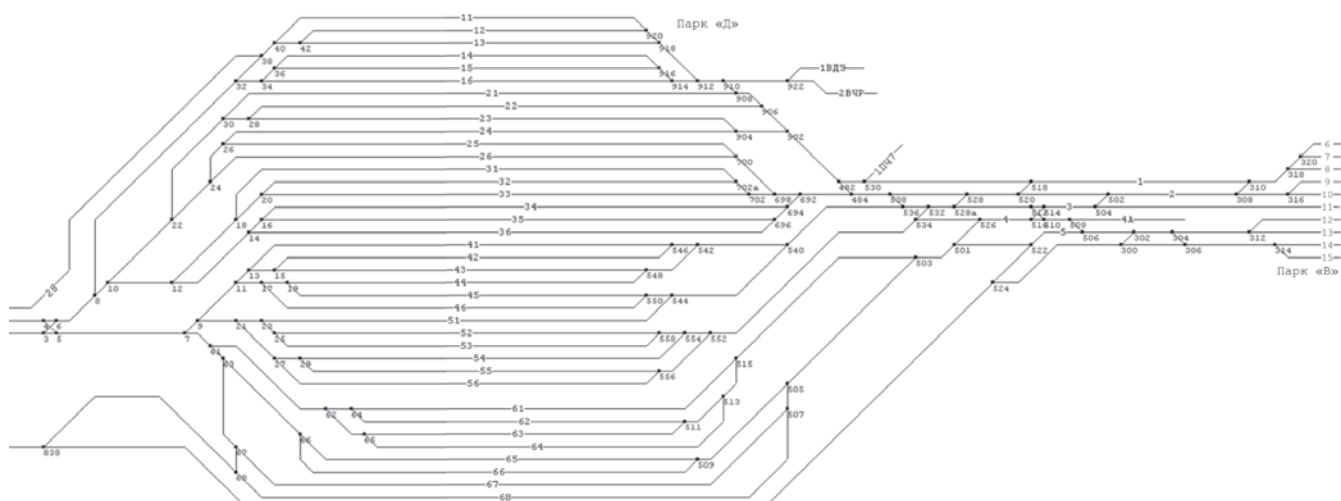


Рисунок 7 — Схема проекта реконструкции парка Д

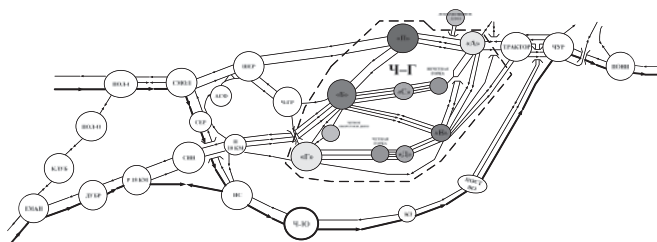


Рисунок 8 — Схема проследования транзитных поездов в обход ст. Ч—Г

По проекту реконструкции (см. рис. 7) построена имитационная модель станции. Система ИСТРА САПР выдает исчерпывающий набор результатов моделирования с демонстрацией узких мест структуры, технологии, загрузки устройств, потоков и простоев, объемных показателей, узких мест технологии по элементам и узких мест структуры по операциям. На последнем этапе экспериментов выдается целый ряд рекомендаций по совершенствованию работы станции в техническом и технологическом аспекте, что особенно важно при развитии или проектировании станции либо узла [2].

Результаты вычислительных экспериментов (рис. 9 — 10, табл. 1) подтверждают, что система справляется с переработкой заданного входного вагонопотока как при существующем, так и при новом путевом развитии. Но у последнего показатели работы выше, а суммарные задержки ниже — 72 ч против 98 ч.

Простой транзитного вагона с переработкой сократился на 0,33 ч (20 мин). Также снизился размер рабочего парка на 4%, а вагонооборот увеличился на 2%.

Мировой опыт доказывает, что корректно рассчитать объект со сложной структурой можно только с помощью подробной имитационной модели. И такой этап, как имитационная экспертиза, должен быть в составе проектной документации. Для этого необходима развитая имитационная система с подпрограммой САПР [3].

Анализ результатов моделирования системой ИСТРА САПР

1. Пропускная способность и простои вагонов

Станция может переработать заданный входной поток.

По станции	
прибыло поездов	105
убыло поездов	86
прибыло вагонов	7152
убыло вагонов	5967
средний простой вагона	6.08
суммарная задержка	97.51

Не принято	
поездов	0
вагонов	0

Рисунок 9 — Общие параметры работы четной системы ст. Ч—Г до реконструкции

Анализ результатов моделирования системой ИСТРА САПР

1. Пропускная способность и простои вагонов

Станция может переработать заданный входной поток.

По станции	
прибыло поездов	105
убыло поездов	88
прибыло вагонов	7173
убыло вагонов	6119
средний простой вагона	5.75
суммарная задержка	72.12

Не принято	
поездов	0
вагонов	0

Рисунок 10 — Общие параметры работы четной системы ст. Ч—Г после реконструкции



Таблица 1 — Сводная таблица показателей работы четной системы ст. Ч—Г

Показатель		Значение показателя до реконструкции		Значение показателя после реконструкции	
Транзит с перерывом	Простой в ПП, ч	6,08	1,06	5,75	0,98
	Расформирование, ч		0,35		0,35
	Простой в СП, ч		3,55		3,34
	Простой в ПО, ч		1,12		1,08
Рабочий парк, ваг.		3324		3209	
Вагонооборот, ваг.		13119		13392	
Коэффициент загрузки маневровых локомотивов (гор/форм), %		47,4/70,5		48,5/69,9	

В исследовании представлены возможности имитационной экспертизы проектов развития станций на примере построения подробной модели четной системы станции Ч—Г. Эксперименты на модели позволили выявить причины задержек поездов, которые повышают уязвимость станции к технологическим сбоям и снижают уровень безопасности выполняемых работ. На основании рекомендаций, выдаваемых системой, разработан проект реконструкции транспортного объекта. Исчерпывающие результаты в процессе проведения вычислительных экспериментов позволили обосновать эффективность и безопасность предлагаемого проекта.

Литература

1. Бухтояров В.Ф. Управление профессиональной безопасностью работников железнодорожного транспорта // Вестник УрГУПС. 2009. № 1. С. 77 — 82.

2. Тимухина Е.Н. Повышение функциональной надежности железнодорожных станций при технологических сбоях : автореф. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург : УрГУПС, 2012. 45 с.

3. Тимухина Е.Н. Методология исследования работоспособности станций при технологических сбоях // Транспорт Урала. 2011. № 4. С. 58 — 62.

4. Козлов П.А., Козлова В.П. Расчет параметров проектируемых транспортных узлов // Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 36 — 38.

5. Владимирская И.П. Оптимизация структурно-функционального взаимодействия в транспортных и производственно-транспортных системах : автореф. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург : УрГУПС, 2011. 48 с.

6. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М. : Техинформ, 2001. 255 с.

References

1. Bukhtoyarov V.F. Upravlenie professionalnoy bezopasnostyu rabotnikov zheleznodorozhnogo transporta [Managing occupational safety of railway transport employees] // USURT Herald. 2009. No. 1. P. 77–82. ISSN 2079-0392.

2. Timukhina E.N. Povyshenie funktsionalnoy nadezhnosti zheleznodorozhnykh stantsiy pri tekhnologicheskikh sboyakh:[Improving functional reliability of railway stations in case of technological failures] abstract of Engineering DSc thesis. Ekaterinburg : USURT, 2012. 45 p.

3. Timukhina E. N. Metodologiya issledovaniya rabotosposobnosti stantsiy pri tekhnologicheskikh sboyakh [Methods of investigation of station performance capability in case of process faults] // Transport of the Urals. 2011. No. 4. P. 58–62. ISSN 1815-9400.

4. Kozlov P.A., Kozlova V.P. Raschet parametrov proektiruemykh transportnykh uzlov [Calculation of parameters of designed hubs] // Zheleznodorozhny transport. 2008. No. 7. P. 36–38. ISSN 0044-4448.

5. Vladimirskaia I.P. Optimizatsiya struktumno-funktsionalnogo vzaimodeystviya v transportnykh i proizvodstvenno-transportnykh sistemakh [Optimization of structural and functional interaction in transport and production and transportation systems]: abstract of DSc Thesis. Ekaterinburg : USURT, 2011. 48 p.

6. Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznnykh dorogakh kolei 1520 mm. [Design regulations and standards for marshaling facilities at 1520 mm gauge railways] M.: Tekhinform, 2001. 255 p.

УДК 621.333.048.015

Михаил Гелиевич Дурандин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
Иван Александрович Кузьминых, ассистент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЯКОРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Mikhail G. Durandin, PhD in Engineering, Associate Professor of «Electric traction» Chair, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg,
Ivan A. Kuzminykh, Assistant of «Electric traction» Chair, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg

Calculation Of Unsteady Thermal Processes In Anchor Insulation Of Traction Motors

Аннотация

Приведено теоретическое описание математической модели по расчету неоднородных и нестационарных тепловых полей в якорных конструкциях тяговых электродвигателей в среде COMSOL Multyphysics. На примере действующего типа тягового электродвигателя ТЛ-2К1 показана возможность уточненного расчета температурных потенциалов в многослойной структуре якорной изоляции с учетом случайного характера нагружений и режимов работы локомотива.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, высоковольтная изоляция, тепловое поле, температура, распределение температурных потенциалов.

Abstract

Theoretical description of the mathematical model for calculation of heterogeneous and non-stationary thermal fields in anchor structures of traction motors in COMSOL Multyphysics environment has been performed. Using the example of currently used traction motor TL 2K1, the opportunity for improved calculation of temperature potentials in multilayer structure of anchor insulation is described, considering the random nature of loads and locomotive operation modes.

Keywords: traction motor, high-voltage insulation, heat field, temperature, temperature potential distribution.

Намеченные правительством задачи по модернизации экономики страны ставят перед железнодорожным транспортом в качестве долгосрочной перспективы цель по развитию движения тяжёловесных поездов с одновременным ростом технических скоростей. При этом предполагается, что наращивание единичной мощности локомотивов не только не снизит уровень их надежности, но и будет сопровождаться ее повышением.

Для успешной реализации поставленного комплекса задач особое внимание должно уделяться изучению и устранению причин отказов наименее надежных узлов локомотивов, которыми традиционно являются тяговые электродвигатели (ТЭД). Статистика отказов тяговых электродвигателей ТЛ-2К1 грузовых электропоездов на Свердловской железной дороге за 2011 г. (рис. 1) свидетельствует о том, что в подавляющем большинстве случаев порчи тяговых электродвигателей связаны с выходом из строя их якорей, преимущественно по причине пробоя высоковольтной изоляции обмоток.



Рисунок 1 — Распределение отказов по элементам тяговых электродвигателей серии ТЛ-2К1 и их якорей

Считается, что наиболее значимым фактором в условиях эксплуатации, определяющим долговечность работы изоляционных покрытий, является уровень их тепловых нагружений, определяемый по установившейся температуре нагрева меди и ограниченный классом нагревостойкости для рассматриваемого типа изоляции.

Однако следует заметить, что такой интегрированный подход к формулированию условий надежного функционирования якорной изоляции в целом носит усредненный и потому приближенный характер. Это обусловлено тем, что в радиальном направлении якорная изоляция тяговых электродвигателей не обладает однородной структурой и представляет собой многослойную композицию, составленную из разнородных диэлектрических материалов с индивидуальными уровнями тепловых потенциалов и допустимыми температурными ограничениями в отношении каждого из них. В еще большей степени неправомерно говорить об однородных условиях нагрева якорной изоляции в аксиальном направлении движения подогревающегося потока воздуха.

По этой же причине уровни потенциальной загруженности каждого из изоляционных слоев, непосредственно определяющие уровень надежности работы якорной изоляции, также проявляют функциональную зависимость от градиентов температурных распределений. Это связано с тем, что послойное распределение электрических потенциалов зависит от соотношений показателей активной проводимости и диэлектрической проницаемости использованных в структуре изоляционных материалов, существенно различающихся своими температурными зависимостями (табл. 1 и 2).

Таблица 1 — Зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры изоляционных материалов, применяемых в тяговом электромашиностроении

$\tau, ^\circ\text{C}$	ПЭТВСД	ЛСЭП-934	ПЭТФ	ЛЭС	Изофлекс
42	1,96	6,04	2,32	2,69	3,73
63	2,02	6,75	2,32	2,87	3,85
85	2,14	7,61	2,34	3,13	4,07
100	2,23	8,26	2,35	3,32	4,22
120	2,35	9,21	2,36	3,60	4,42
140	2,47	10,26	2,38	3,89	4,64

Таблица 2 — Зависимости удельной электрической проводимости от температуры изоляционных материалов, применяемых в тяговом электромашиностроении, пСм/м

$\tau, ^\circ\text{C}$	ПЭТВСД	ЛСЭП-934	ПЭТФ	ЛЭС	Изофлекс
40	0,3462	0,0310	0,0034	721	0,0307
60	0,3570	0,0389	0,0043	223	0,0350
80	0,3760	0,1845	0,0054	441	0,0730
100	0,5827	0,6450	0,3470	1066	0,2291
120	0,7607	3,4600	2,6690	2559	0,5758
140	1,0240	18,560	20,5300	6145	1,4850

Следует признать, что учет названных особенностей при анализе тепловой напряженности изоляции тяговых электродвигателей хотя и отличается значительно большей точностью и полнотой информации, однако до сих пор не реализован в

силу сложности расчетов тепловых полей в композиционных средах с учетом их неоднородного и нестационарного характера [1, 2]. В то же время стремительное развитие микропроцессорной техники и ее вычислительных возможностей позволяет снимать ранее непреодолимые ограничения по сложности расчетов для достижения их предельной степени точности [3].

На сегодняшний день наиболее широко распространенным способом теплового расчета электрических машин является метод эквивалентных тепловых схем замещения [4, 5]. Не отрицая очевидные преимущества данного метода в практическом плане, нельзя не отметить ограниченные возможности его применения при расчетах нестационарных тепловых процессов, а также при исследовании закономерностей распределения температуры в трехмерных пространственно-неоднородных средах.

Устранить недостатки существующих методик тепловых расчетов возможно благодаря применению технологии компьютерного моделирования. На сегодняшний день известно несколько программных продуктов, реализующих данное направление, среди которых наиболее эффективным в решении поставленной задачи представляется среда COMSOL Multiphysics. Работа данной среды основана на решении методом конечных элементов систем дифференциальных уравнений в частных производных, посредством которых описывается большинство физических процессов.

Аналитическое описание теплового процесса включает в себя составление дифференциальных уравнений и условий однозначности, описывающих физические параметры расчетной среды, форму и геометрические размеры объекта, начальную температуру, условия охлаждения и др. [6, 7]. Дифференциальное уравнение теплопроводности при наличии внутренних источников теплоты в общем случае имеет вид [8, 9]

$$\rho c \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_x \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = p_v, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала;

λ — удельная теплопроводность материала;

C — удельная теплоемкость материала;

p_v — удельная объемная мощность источника тепла.

В силу пренебрежимо малых токов активной проводимости можно считать, что в самих изоляционных слоях источников тепла нет. Поэтому для изоляционного объема процесс теплопереноса будет описываться уравнением

$$\rho c \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_x \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Применительно к медным и стальным участкам якорной конструкции правая часть уравнения (1) представляет собой потери энергии в активных частях электрической машины, среди которых доминирующее влияние на нагрев оказывают их электромагнитные составляющие. Анализ поведения данных видов потерь на основании общеизвестных выражений показывает, что применительно к условиям эксплуатации тяговых электродвигателей их нельзя считать постоянными, поскольку они функционально зависят от целого комплекса переменных величин.

Так, при рассмотрении потерь в меди обмотки, определяемых законом Джоуля — Ленца [10]

$$P_m = I^2 r, \quad (3)$$

очевидным является их сильная зависимость от тока якоря, который, в свою очередь, является нестационарной величиной, в реальных условиях случайным образом варьирующей свои значения от нуля до величины токов уставки аппаратов защиты. Кроме того, из-за колебаний температуры нагрева меди меняется и сопротивление самой якорной обмотки, обуславливая его нелинейную температурную зависимость.

Нестационарное поведение тока якоря является причиной варьирования и магнитных потерь в зубцах и ярме якоря. Данная связь отображается выражением для определения магнитных потерь в стали [10]

$$P_c = k B^2 f \beta, \quad (4)$$

где k — постоянная, зависящая от марки стали и толщины листа;

B — магнитная индукция;

f — частота перемагничивания;

β — показатель степени, определяемый физической природой магнитных потерь.

Входящая в выражение (4) магнитная индукция является нелинейной функцией тока якоря по кривой намагничивания для якорной стали и изменяется вместе с ним при регулировании режимов движения. Кроме того, магнитные потери существенно зависят от скорости движения локомотива через частоту перемагничивания f , также выступающей случайной величиной по временной координате.

Подставляя в правую часть уравнения (1) выражения (3) и (4), с учетом вышесказанного имеем:

$$\rho c \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_x \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = I^2(t) r(t); \quad (5)$$

$$\rho c \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_x \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = k B^2(t) f^\beta(t). \quad (6)$$

Полученные уравнения (2), (5) и (6), описывающие процессы теплопереноса в изоляции меди и стали якоря, являются нелинейными, причем входящие в них функции $I(t)$, $B(I(t))$, $f(t)$ не имеют точного аналитического описания. Данные зависимости являются случайными временными функциями, производными от кривых движения поезда, и могут быть получены на основе экспериментальных измерений или по результатам тяговых расчетов.

Составленные дифференциальные уравнения являются необходимым, но недостаточным условием для однозначного описания физического процесса. Для конкретизации частных решений должны быть сформулированы начальные временные и пространственные граничные условия, задающие закон взаимодействия между поверхностями взаимодействующих элементов расчетной физической системы и на их границе с окружающей средой.

В качестве временного начального условия принималось постоянство температуры во всем объеме тела в начальный момент времени [7]

$$\tau_{t=0} = \tau_0. \quad (7)$$

Необходимыми пространственными граничными условиями для теплового расчета обмотки якоря тягового электродвигателя являются:

- граничное условие второго рода, применяемое для линий симметрии

$$n(\lambda \nabla \tau) = 0; \quad (8)$$

- граничное условие третьего рода применительно к внешней и внутренней поверхностям якоря и поверхности вентиляционных каналов

$$n(\lambda \nabla \tau) = -h(t)(\tau_{\text{окр}} - \tau); \quad (9)$$

- граничное условие четвертого рода, характерное для поверхностей соприкосновения меди и стали якоря с изоляционными компонентами, а также для поверхностей соприкосновения соседних слоев, составляющих изоляционную конструкцию

$$n(\lambda_1 \nabla \tau) = n(\lambda_2 \nabla \tau); \quad (10)$$

где λ — коэффициент теплопроводности;

$h(t)$ — коэффициент теплоотдачи;

$\tau_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды;

n — вектор нормали к границе.

Следует также учесть, что коэффициент теплоотдачи h , входящий в выражение (9), как и потери в активных частях машины, представляет собой нестационарную случайную величину, поскольку является функцией скорости движения локомотива и количества охлаждающего воздуха [8, 9].

Полученные выражения (2), (5) — (10) и условия (7) — (10) образуют систему нелинейных, неоднородных дифференциальных уравнений, описывающих нестационарный процесс теплопереноса в ядре тягового электродвигателя. Решение такой системы уравнений с учетом сложной геометрии элементов исследуемого узла и случайного характера ряда величин классическими аналитическими методами не представляется возможным. Данное обстоятельство заставляет отказаться от поиска фундаментального решения в форме алгебраического уравнения и искать решения приближенно-численными методами, реализованными в COMSOL Multiphysics. Результатом расчета в этом случае выступает совокупность числовых решений, описывающих тепловое поле в дискретных точках рассчитываемой области изоляции по заданным значениям реализаций перечисленных выше случайных временных функций, характеризующих процесс движения поезда.

Предварительный анализ вычислительных возможностей среды COMSOL Multiphysics и пробные расчеты применительно к условиям постановки рассматриваемой задачи показали, что полномасштабное представление якоря тя-

гового электродвигателя как трехмерного объекта с полной детализацией составляющих его элементов ограничивается вычислительными возможностями настольных персональных компьютеров и требует использования специализированных ЭВМ или вычислительных комплексов. На сегодняшний день для средних по мощности ПЭВМ приходится отказываться от полномасштабной трехмерной модели и переходить к расчету двумерного образующего симметричную конструкцию якоря сегмента, геометрия которого представлена на рис. 2.

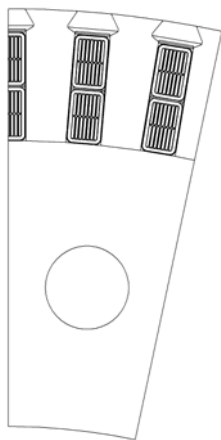


Рисунок 2 — Геометрия двумерной модели образующего сегмента якоря тягового электродвигателя ТЛ-2 К1

Структура якорной изоляции, использованная при компьютерном моделировании тепловых процессов, принималась стандартной и соответствующей технологии изготовления якорных секций на Екатеринбургском электровагонном заводе. Расчетные значения физических параметров лент принимались согласно данным табл. 3, полученных в исследованиях [11] экспериментально.

Таблица 3 — Тепловые физические характеристики изоляционных материалов

Марки образцов изоляции	Толщина, мм	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
ПЭТВСД	0,14	2250	846	0,125
ЛСЭП-934	0,02	2900	864	0,100
ПЭТФ	0,10	1350	1000	0,023
ЛЭС	0,08	2250	846	0,063
Изофлекс	0,16	1200	1692	0,307

На основе созданной модели в среде COMSOL Multiphysics был произведен расчет тепловых потенциалов в слоях якорной изоляции тягового электродвигателя ТЛ-2К1 грузовых электровозов постоянного тока серий ВЛ10 и ВЛ11 применительно к условиям их эксплуатации на участке Екатеринбург-Сортировочный — Дружинино Свердловской железной дороги. Согласно приказу № 171/Н от 28.03.11,

установленная весовая норма грузовых поездов на данном участке с расчетным уклоном 9,5‰ составляет 4000 т для двухсекционных локомотивов указанных выше серий. Эти данные явились основой для проведения тяговых расчетов по программе OMEGA-P, в результате которых были получены кривые движения поезда, представленные на рис. 3 и 4. Следует отметить, что в условиях ограниченной производительности ПК для сокращения времени расчета и объема вычислительных данных кривые движения рассчитывались не для всего участка, а только до конца расчетного подъема, где ожидается достижение температурой обмотки якоря максимальных значений.

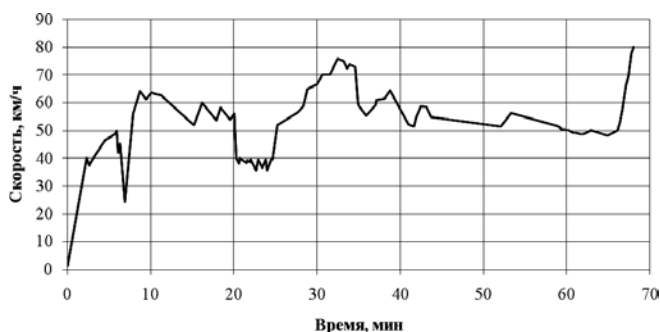


Рисунок 3 — Кривая скорости электровоза ВЛ11 при движении на участке Екатеринбург-Сортировочный — Дружинино с составом массой 4000 т

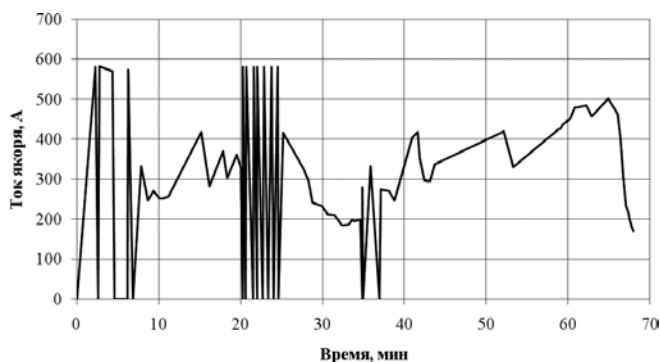


Рисунок 4 — Кривая тока якоря электровоза ВЛ 11 при движении на участке Екатеринбург-Сортировочный — Дружинино с составом массой 4000 т

Зависимость магнитной индукции от времени определялась по кривой тока якоря методом интерполяции магнитной характеристики тягового двигателя ТЛ-2К1. Начальные значения температуры элементов якоря принимались равными +20°C, соответствующими средней летней температуре окружающей среды.

Временные зависимости изменения температуры, межвитковой, среднего слоя корпусной и покровной изоляций обмотки якоря тягового электродвигателя ТЛ-2К1, полученные при использовании программной среды COMSOL Multiphysics, представлены на рис. 5.

На основании полученных зависимостей можно заключить, что наибольшие тепловые нагрузки приходятся на межвитковую изоляцию, температура нагрева которой для

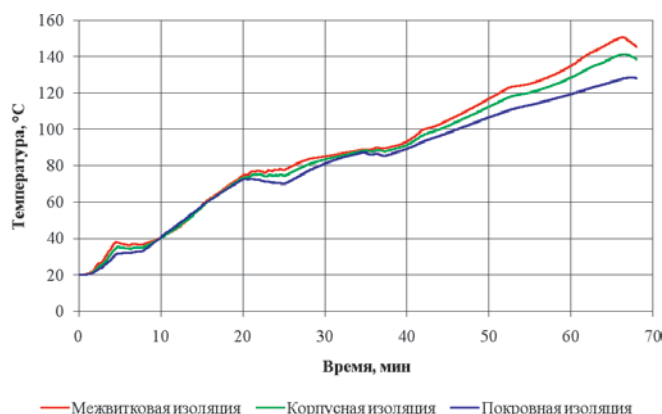


Рисунок 5 — Кривые нагрева структурных частей якорной изоляции тягового электродвигателя ТЛ-2 К1

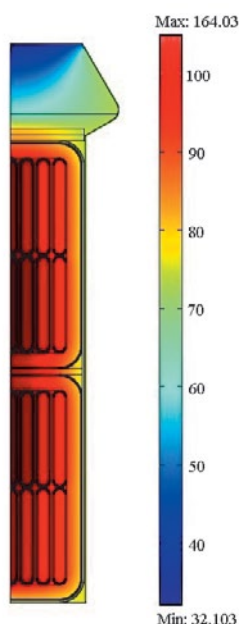


Рисунок 6 — Распределение температурных потенциалов в пазу якоря тягового электродвигателя ТЛ-2 К1 по достижении поездом конца расчетного подъема

рассчитываемых условий достигает 150°C, приближаясь к предельно допустимому уровню для используемого типа изоляционных покрытий. Обращает на себя внимание и то, что максимальные значения температур для корпусных слоев изоляции незначительно отличаются от температурного экстремума межвитковой изоляции. Это позволяет сделать вывод о том, что слои корпусной изоляции якорей двигателя ТЛ-2К1 в той же мере подвержены ускоренным темпам теплового старения.

С научной точки зрения интерес представляет необычное распределение температурных потенциалов в начальный период движения. На диаграмме рис. 5 видно, что в интервале с 10-й по 15-ю минуту температура нагрева покровных слоев превосходила аналогичные показатели для других

компонент изоляции. Причиной такого аномального распределения температурных потенциалов в ненагретой изоляции может быть различная интенсивность тепловыделений от электрических и магнитных потерь и отличия в тепловых постоянных времени слоев покровной, корпусной и межвитковой изоляций.

Практический интерес представляют также результаты расчетов по выявлению местоположения наиболее нагреваемой области изоляции в пазу якоря. На рис. 6 представлено распределение температурных потенциалов в пазу якоря тягового электродвигателя ТЛ-2 К1 по истечении 66 мин после начала движения.

Полученные результаты позволяют утверждать, что максимальная температура характерна для центрального верхнего элементарного проводника нижней секции обмотки якоря и достигает 164°C по причине наихудших условий охлаждения в этой области изоляции.

Для оценки эффективности предлагаемого метода расчета на рис. 7 приведены температурные зависимости нагрева для медных проводников в сравнении с аналогичными результатами, полученными классическим «способом МПС».

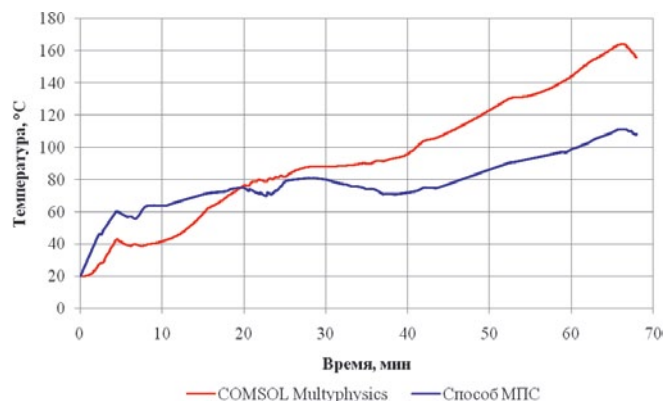


Рисунок 7 — Кривые нагрева медных проводников обмотки якоря тягового электродвигателя ТЛ-2 К1

Сравнительный анализ полученных результатов указывает на существенное расхождение расчетных значений температурных потенциалов, соответствующих различным методикам. Максимальная разница температур, доходящая в конце расчетного подъема до 50°C, объясняется усредненным характером расчетов при использовании «метода МПС» из-за большого числа упрощений и расчетных коэффициентов интегрального характера, усредненным образом описывающих двигатель в целом.

Проведенные исследования тепловых процессов на примере якорной конструкции тягового электродвигателя ТЛ-2К1 доказывают возможность практической реализации значительно более точной методики тепловых расчетов в изоляционных покрытиях силового электромашиного оборудования локомотивов. Достоверность предлагаемой методики основывается на использовании в описании тепловых явлений фундаментальных дифференциальных уравнений теплофизики, решение которых численными методами позволяет получать точечные характеристики температурного поля по каждой координате изоляционного объема машины с

учетом нестационарного и случайного характера параметров движения локомотива. Это дает возможность уже на стадии проектирования научно обосновывать выбор диэлектрических материалов и классов нагревостойкости изоляционных композиций на их основе; выявлять наиболее лимитирующие по условиям нагрева участки изоляционных покрытий и оптимизировать режимы вентиляции тяговых электродвигателей; назначать весовые нормы поездов под заданные участки об-

ращения и разрабатывать наиболее эффективные режимы их вождения.

Дальнейшее развитие данного направления представляется в разработке универсальной методики единого расчета электрических и тепловых полей с учетом их функциональной взаимозависимости для трехмерной модели изоляционного объема рабочих обмоток тяговых электродвигателей под заданные режимы и условия их работы.

Литература

1. Дурандин М.Г. Расчет электрических полей в изоляционных структурах тяговых электродвигателей локомотивов // Транспорт Урала. 2006. № 1 (8). С. 50 — 56.
2. Дурандин М.Г., Кузьминых И.А. Обоснование методики расчета электрических полей в многослойных изоляционных покрытиях // Транспорт Урала. 2009. № 3 (22). С. 77 — 81.
3. Дурандин М.Г., Кузьминых И.А. Расчет электрических полей в якорной изоляции тяговых электродвигателей локомотивов с учетом теплового фактора // Вестник УрГУПС. 2010. № 4 (8). С. 30 — 37.
4. Минаев Б.Н., Платов Н.А. Расчет температурного поля электромашины // Мир транспорта. 2009. № 1. С. 42 — 49.
5. Космодамианский А.С. Автоматическое регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов : монография. М. : Маршрут, 2005. 256 с.
6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М. : Энергоиздат, 1981. 416 с.
7. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. Л. : Энергия, 1974. 384 с.
8. Находкин М.Д., Василенко Г.В., Козорезов М.А., Лупкин Д.М. Проектирование тяговых электрических машин. М. : Транспорт, 1967. 536 с.
9. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. Л. : Энергоатомиздат, 1983. 216 с.
10. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины : в 2-х частях. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы : изд. 3-е, перераб. Л. : Энергия, 1972. 544 с.
11. Фролов Н.О. Оптимизация изоляционных структур тяговых электродвигателей локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург : УрГУПС, 2004. 167 с.

References

1. Durandin M.G. Raschet elektricheskikh poley v izolyatsionnykh strukturakh tyagovykh elektrodvigately lokomotivov [Electric fields calculation in the insulating structures of locomotive traction motors] // Transport of the Urals. 2006. No. 1(8). P. 50–56. ISSN 1815–9400.
2. Durandin M.G., Kuzminykh I.A. Obosnovanie metodiki rascheta elektricheskikh poley v mnogoslownykh izolyatsionnykh pokrytiyakh [Substantiation for method of electric fields calculation in multilayer insulation coatings] // Transport of the Urals. 2009. No. 3 (22). P. 77–81. ISSN 1815–9400.
3. Durandin M.G., Kuzminykh I.A. Raschet elektricheskikh poley v yakornoy izolyatsii tyagovykh elektrodvigately lokomotivov s uchedom teplovogo faktora [Electric fields calculation in anchor insulation of locomotive traction motors with account of thermal factor] // Herald of Ural State University of Railway Transport. 2010. No. 4 (8). P. 30–37. ISSN 2079–0392.
4. Minaev B.N., Platov N.A. Raschet temperaturnogo polya elektromashiny [Calculation of electrical machine temperature field] // Mir transporta. 2009. No. 1. P. 42–49. ISSN 1992–3252.
5. Kosmodamianskiy A.S. Avtomaticheskoe regulirovanie temperatury obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin lokomotivov [Automatic temperature control of windings in locomotive traction electrical machinery]: Monograph. M.: Marshrut, 2005. 256 p.
6. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha. [Heat transfer] M.: Energoizdat, 1981. 416 p.
7. Filippov I. F. Osnovy teploobmena v elektricheskikh mashinakh. [Heat transfer fundamentals for electrical machines.] L.: Energiya, 1974. 384 p.
8. Nakhodkin M.D. Proektirovanie tyagovykh elektricheskikh mashin [Design of traction electrical machinery] / M.D. Nakhodkin, G.V. Vasilenko, M.A. Kozorezov, D.M. Lupkin. M.: Transport, 1967. 536 p.
9. Gurevich E.I., Rybin Yu.L. Perekhodnye teplovy protsessy v elektricheskikh mashinakh. [Transient thermal processes in electrical machines.] L. : Energoatomizdat, 1983. 216 p.
10. Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M. Elektricheskie mashiny. [Electrical Machines] In 2 parts. Part 1. Mashiny postoyannogo toka. Transformatory. [DC machines. Transformers.] 3rd revised edition. L.: Energiya, 1972. 544 p.
11. Frolov N.O. Optimizatsiya izolyatsionnykh struktur tyagovykh elektrodvigately lokomotivov [Optimization of locomotive traction motors insulating structures] : Engineering PhD Thesis. Ekaterinburg : USURT, 2004. 167 p. Defended on 25.02.2005

УДК 681.51

Алексей Тарасович Когут, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМИ ПРИ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ МЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Alexey T. Kogut, DSc in Engineering, Professor of «Automation and Control Systems» Chair, Omsk State Transport University (OmGUPS)

Synthesis Of Vibration Control Algorithms In Vibrodiagnostic Control Of Rolling Stock Mechanical Parts

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы управления механическими колебаниями в вибродиагностических стендах за счет изменения жесткости пневмоподвески. Синтез автоматической системы контроля проводится на основе численных методов решения обратной задачи нелинейной динамики. Полученные приближенные алгоритмы используют линеаризацию нелинейной модели объекта, учитывающей первые и вторые производные ряда Тейлора. Алгоритмы управления реализуются в программном обеспечении микроконтроллеров автоматизированного диагностического комплекса. Эффективность разработанной системы управления подтверждается результатами имитационного моделирования.

Ключевые слова: техническая диагностика, вибродиагностические стенды, пневматическая подвеска, математическая модель объекта, траекторное управление, линеаризация, приближенные алгоритмы, контроллер, имитационное моделирование.

Abstract

The paper addresses issues of mechanical vibration control in vibrodiagnostic benches through changing stiffness of pneumatic suspension. Synthesis of automatic control system is performed based on numerical methods for solving inverse problem of nonlinear dynamics. Obtained approximate algorithms use linearization of nonlinear object model, taking into account first and second derivatives of Taylor series. Control algorithms are implemented in software of automated diagnostic system microcontrollers. The effectiveness of the developed control system is confirmed by simulation results.

Keywords: technical diagnostics, vibration diagnostics stands, pneumatic suspension, mathematical object model; trajectory control, linearization, approximation algorithms, controller; simulation.

Обеспечение надежности и безопасности — важнейшие требования, предъявляемые к устройствам железнодорожного транспорта. При ремонте механических узлов подвижного состава иногда необходимо осуществлять вибродиагностический контроль качества продукции [1].

При диагностировании устройств железнодорожного транспорта широко применяется автоматизированный комплекс «Прогноз-1М» [2, 3]. Он предназначен для определения технического состояния механических узлов (подшипников качения, зубчатых передач редукторных, буксовых, моторных устройств) на основе обработки сигналов вибрации и частоты вращения.

Предлагается использовать аппаратные и программные средства комплекса «Прогноз-1М» для синтеза замкнутой автоматической системы управления вынужденными колебаниями вибродиагностического стенда. Для обеспечения требуемой формы колебаний (например, гармонической) применяется пневматическая подвеска (пневмооболочка). Структурная схема предлагаемой системы приведена на рис. 1.

В систему входят усилитель мощности 4 и гидроусилитель 3 для формирования усилия $F(t)$ в поршне и перемещения инерционной массы вибростенда в соответствии с заданным законом изменения координаты $x(t)$.

Сигнал, пропорциональный ускорению вертикальных перемещений от вибродатчика 1, подается на коммутатор 9 и блок управления и фильтрации 10. После дискретизации аналого-цифровым преобразователем 11 значения $\ddot{x}(kT_0)$ поступают в порты сигнального процессора 12, где вычисляются дискретные значения $\dot{x}(kT_0)$ и $x(kT_0)$. Для формирования воздействия $F(t)$ сигнал $\ddot{x}(t)$ подается на аналого-цифровой преобразователь 6, сигнальный процессор 7 и цифроаналоговый преобразователь 8.

В программном обеспечении персонального компьютера 13 необходимо реализовать соответствующие алгоритмы управления. Дискретный сигнал $u(kT_0)$ подается на цифро-

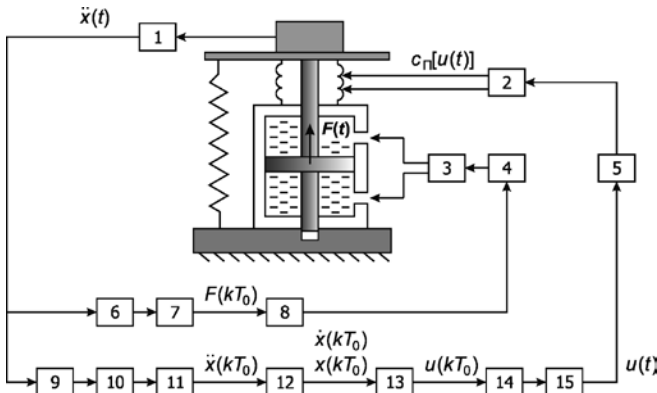


Рисунок 1 — Структурная схема системы автоматического управления вибродиагностическим стендом:

1 — датчик; 2 — исполнительный механизм регулирования жесткости пневмоподвески; 3 — гидравлический усилитель; 4, 5 — усилители мощности; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — сигнальный процессор; 8 — цифроаналоговый преобразователь; 9 — коммутатор; 10 — блок усиления и фильтрации; 11 — аналого-цифровой преобразователь; 12 — сигнальный процессор; 13 — персональный компьютер; 14 — цифроаналоговый преобразователь; 15 — блок усиления и фильтрации

аналоговый преобразователь 14 и блок усиления и фильтрации 15, а непрерывный сигнал управляющего воздействия $u(t)$ поступает на вход усилителя мощности 5, где он усиливается до уровня необходимого для функционирования исполнительного механизма изменения жесткости пневмоподвески вибродиагностического стенда.

При определении алгоритма управления $u(t)$ необходимо получить математическую модель электромеханического объекта подвижной части стенда, которую можно записать в виде дифференциального уравнения колебательного звена [4]

$$m \ddot{x}(t) + b \dot{x}(t) + c_0 x(t) + c_{\Pi}[u(t)] x(t) = F(t), \quad (1)$$

где $F(t)$ — входное механическое воздействие от гидроцилиндра;

m — масса подвижной части вибростенда;

b, c_0 — суммарные коэффициенты вязкого и жесткого трения всех упругих пружин.

В уравнении (1) жесткость пневмооболочки $c_{\Pi}[u(t)]$ представим следующим образом:

$$c_{\Pi}[u(t)] = f(u). \quad (2)$$

Рассмотрим определение алгоритма $u(t)$ с помощью методов траекторного управления [5], если вибродиагностический контроль осуществляется при моногармоническом воздействии. Требуемая траектория движения имеет вид

$$g(t) = g_m \sin \omega_b t, \quad (3)$$

где g_m, ω_b — заданные значения амплитуды и частоты синусоидальных колебаний соответственно.

Введем переменные состояния $x_1(t) = x(t)$, $x_2(t) = \dot{x}(t)$ для модели объекта (1) и $g_1(t) = g(t)$, $g_2(t) = \dot{g}(t)$ для желаемой траектории (3). Дифференциальные уравнения модели запишем в виде:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t); \quad (4)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{1}{m} [b x_2(t) + c_0 x_1(t) + c_{\Pi}[u(t)] x_1(t) - F(t)]. \quad (5)$$

При траекторном управлении [5] должны быть выполнены равенства:

$$\dot{x}_1(t) = \dot{g}_1(t); \quad \dot{x}_2(t) = \dot{g}_2(t).$$

В этом случае вместо уравнения (5) будем иметь выражение

$$\dot{g}_2(t) = -\frac{1}{m} [b \dot{g}_1(t) + c_0 x_1(t) + c_{\Pi}[u(t)] x_1(t) - F(t)]$$

или, учитывая аналитические формулы для $\dot{g}_1(t)$ и $\dot{g}_2(t)$, в виде

$$c_{\Pi}[u(t)] = -c_0 + x_1^{-1}(t) m g_m \omega^2 \sin \omega t - x_1^{-1}(t) [b g_m \omega \cos \omega t - F(t)]. \quad (6)$$

Зададим входное воздействие следующим образом:

$$F(t) = [b g_m \omega] \cos \omega t. \quad (7)$$

Тогда с учетом обозначения (2) получим равенство

$$F[u(t)] = \varphi[x(t), g(t)]. \quad (8)$$

Здесь

$$\varphi[x(t), g(t)] = -c_0 + x^{-1}(t) m g_m \omega^2 \sin \omega t \quad (9)$$

и $x(t) = x_1(t)$.

Выберем релейный алгоритм траекторного управления [4, 5], но будем использовать гладкую аппроксимацию

$$f[u(t)] = c_m \text{th}[\beta u(t)] \text{ при } \beta \rightarrow \infty. \quad (10)$$

При аппроксимации (10) возможно аналитическое решение обратной задачи динамики, и алгоритм формирования управляющего воздействия будет иметь вид

$$u(t) = (\beta c_m)^{-1} \text{arcth}[\varphi(t)]. \quad (11)$$

Результаты имитационного моделирования аналитического решения обратной задачи динамики представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 и 3 видно, что для обеспечения заданных колебаний $x(t)$ (см. рис. 2) необходим автоколебательный характер переходных режимов для процесса изменения жесткости пневмоподвески (см. рис. 3), поэтому обратимся к алгоритмам, рассмотренным в работе [6].

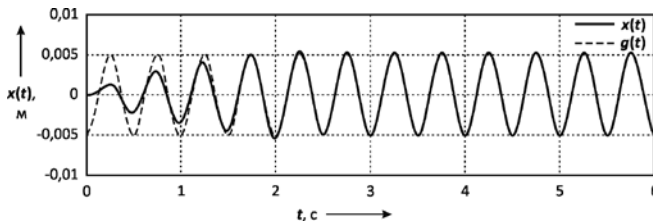


Рисунок 2 — Переходный процесс в системе с релейным алгоритмом обратной динамики

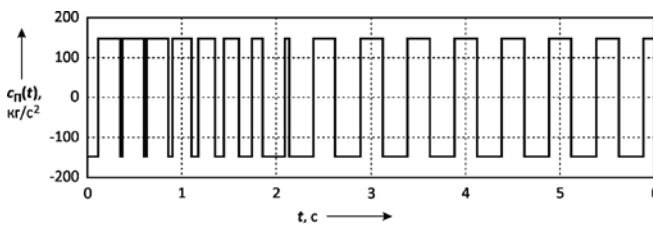


Рисунок 3 — Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе

Приближенные алгоритмы, основанные на схемах линеаризации, разработаны для класса дискретных моделей, поэтому введем дискретное время $t = kT_0$, где T_0 — шаг дискретизации. Вместо выражения (9) и модели объекта управления будем иметь:

$$\varphi[x(kT_0), g(kT_0)] = -c_0 + x^{-1}(kT_0)mg_m\omega^2 \sin(\omega kT_0); \quad (12)$$

$$x(kT_0) = x[(k-1)T_0] - \frac{T_0}{m} \{bg_m\omega \cos[\omega(k-1)T_0] + c_0x[(k-1)T_0] + f\{u[(k-1)T_0]\} \times x[(k-1)T_0] - bg_m\omega \cos[\omega(k-1)T_0]\}. \quad (13)$$

Нелинейную функцию $f(\cdot)$ заменим аппроксимацией рядом Тейлора второго порядка

$$f[u(kT_0)] = f_{k-1} + f'_{k-1}\Delta u + 0,5f''_{k-1}\Delta u^2, \quad (14)$$

где $f_{k-1} = f(u)$;

$$f'_{k-1} = \frac{\partial f(u)}{\partial u}; \quad f''_{k-1} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \text{ при } u = u[(k-1)T_0].$$

Аналитические выражения для первой и второй производных имеют вид

$$f'(u) = c_m\beta \operatorname{ch}^{-2}(\beta u); \quad f''(u) = -2c_m\beta^2 \operatorname{sh}(\beta u).$$

В формуле (14) разность

$$\Delta u = u(kT_0) - u[(k-1)T_0]. \quad (15)$$

Выражение (14) является нелинейным относительно Δu . Применим подход, предлагаемый в работе [6], и запишем на основе формулы (14) приближенную линейную аппроксимацию второго порядка

$$f[u(kT_0)] = f_{k-1} + [f'_{k-1} + 0,5f''_{k-1}\delta_{k-1}]\Delta u, \quad (16)$$

где значение разности δ_{k-1} известно и является постоянной величиной.

Используя дискретный аналог выражения (8) и формулы (12), (15) и (16), получим рекуррентный алгоритм второго порядка

$$u(kT_0) = u[(k-1)T_0] - [f'_{k-1} + 0,5f''_{k-1}\delta_{k-1}]^{-1} [c_0 - x^{-1}(kT_0)mg_m\omega^2 \sin(kT_0\omega)]. \quad (17)$$

Численное значение разности δ_{k-1} может быть определено на основе линейной аппроксимации (14)

$$\delta_{k-1} = -(f'_{k-1})^{-1} [c_0 - x^{-1}(kT_0)mg_m\omega^2 \sin(kT_0\omega)]. \quad (18)$$

Результаты имитационного моделирования приближенного алгоритма управления (17) при $u(0)=0,07$ и уравнения модели объекта (13) при $x(0)=-0,012$ в виде процесса изменения жесткости подвески $c_n(t)$ приведены на рис. 4. Переходный режим становится затухающим и в системе устраняются автоколебания.

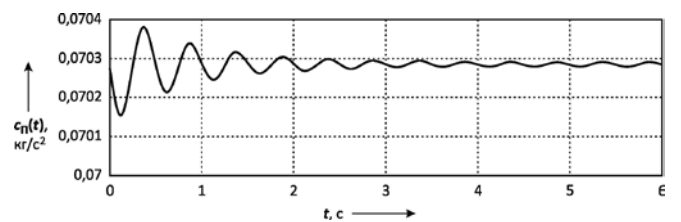


Рисунок 4 — Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе с алгоритмом второго порядка

На основе выражения (18) можно построить приближенный алгоритм траекторного управления первого порядка в виде следующей рекуррентной формулы:

$$u_1(kT_0) = u[(k-1)T_0] - (f'_{k-1})^{-1} [c_0 - x^{-1}(kT_0)mg_m\omega^2 \sin(kT_0\omega)]. \quad (19)$$

Предлагается двухступенчатая вычислительная схема реализации приближенного алгоритма второго порядка (17). На первой ступени вычисляются значения $u_1(kT_0)$ и δ_{k-1} , а на второй по выражению (17) определяется управляющее воздействие $u(kT_0)$, и если ошибка в системе достаточно большая, то $u(kT_0)$ подается на вход объекта. При этом в формуле (17) вместо $u[(k-1)T_0]$ используется значение $u_1(kT_0)$. Если ошибка достаточно мала, то применяется только регулятор первого порядка (19). Двухступенчатая процедура позволяет более эффективно использовать приближенные алгоритмы первого и второго порядков.

Результаты имитационного моделирования приближенного алгоритма управления первого порядка (19) для тех же значений $u(0)$ и $x(0)$ приведены на рис. 5.

Алгоритмы управления первого порядка также устраняют в системе автоколебания и могут быть использованы как на

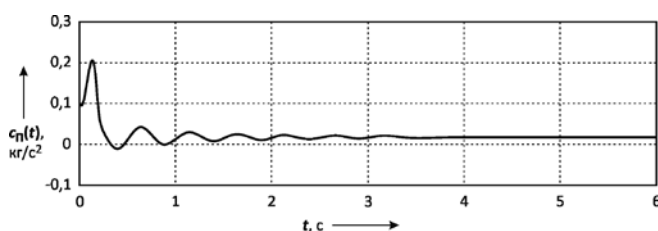


Рисунок 5 — Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе с алгоритмом первого порядка

первой ступени алгоритма (17), так и в виде основного управляющего воздействия $u(kT_0)$.

Таким образом, приближенные алгоритмы траекторного управления могут быть реализованы в программном обеспечении микропроцессорной системы вибродиагностического стенда при техническом контроле механических узлов подвижного состава.

Литература

1. Явленский К.Н., Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. М.: Машиностроение, 1983.
2. Молчанов В.В., Шахов В.Г. Новые технологии и оборудование контроля и диагностирования железнодорожной техники // Известия Транссиба. 2010. № 4. С. 116 — 120.
3. Шахов В.Г. Информационные технологии и алгоритмы в диагностировании железнодорожной техники // Омский научный вестник, 2010. 158 с.
4. Ананьевский И.М., Черноусько Ф.Л., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. Т. 3. 616 с.
6. Когут А.Т. Полиномиальная аппроксимация в некоторых задачах оптимизации и управления. Омск: ОмГУПС, 2003. 243 с.

References

1. Yavlenskiy K.N., Yavlenskiy A.K. Vibrodiagnostika i prognozirovaniye kachestva mekhanicheskikh sistem [Vibration diagnostics and prediction of mechanical systems quality]. M.: Mashinostroyeniye, 1983.
2. Molchanov V.V., Shakhov V.G. Novye tekhnologii i oborudovaniye kontrolya i diagnostirovaniya zheleznodorozhnoy tekhniki [New technologies and equipment for railway machinery monitoring and diagnostics] // Izvestiya Transsiba. 2010. No. 4. P. 116–120.
3. Shakhov V.G. Informatsionnye tekhnologii i algoritmy v diagnostirovaniye zheleznodorozhnoy tekhniki [Information technology and algorithms in railway machinery diagnosis] // Omskiy nauchnyy vestnik. 2010. 158 p.
4. Ananyevskiy I. M., Chernousko F. L., Reshmin S. A. Metody upravleniya nelineynymi mekhanicheskimi sistemami [Control methods for nonlinear mechanical systems]. M.: Fizmatlit, 2006. 328 p.
5. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya [Classical and modern methods of control theory. Synthesis of regulators of automatic control systems] / edited by K. A. Pupkov, N. D. Egupov. M.: MSTU named after N. E. Bauman, 2004. Vol. 3. 616 p.
6. Kogut A. T. Polinomialnaya approksimatsiya v nekotorykh zadachakh optimizatsii i upravleniya [Polynomial approximation in some optimization and control problems]. Omsk: Omsk State Transport University, 2003. 243 p.

УДК 625.033.35: 625.032 37

Валерий Викторович Шилер, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ

Valery V. Shiler, PhD in Engineering, Associate Professor of «Electric Railways Rolling Stock» Chair, Omsk State Transport University (OmGUPS)

Specifics Of Motion Pattern Development Of Standard Wheel Pair

Аннотация

Представлены результаты исследований траекторий движения стандартной колесной пары по рельсовым нитям с реальными геометрическими неровностями для различных поперечных профилей поверхностей катания колес. Определены значения ускорений колесной пары, а также длина пути паразитного проскальзывания колес колесной пары по рельсам. Дана оценка устойчивости движения колесной пары.

Ключевые слова: геометрические неровности рельсов, паразитное проскальзывание колес, извилистое движение, поперечный профиль катания, устойчивость движения.

Abstract

Results of research of motion patterns of a standard wheelset on rail threads with real geometrical irregularities are presented for various cross sections of wheel tread surfaces. Wheel pair accelerations values, as well the length of idle sliding path of the wheelset are determined. Estimation of the wheelset motion stability is provided.

Keywords: geometric irregularities of rails, wheel idle sliding, twisting movement, rolling cross-section, motion stability.

За последние два десятилетия интенсивность износа колес и рельсов в 3 — 5 раз выше (особенно боковой подрез гребня и головки рельса) предусмотренных в технологиях эксплуатации пути и подвижного состава. Проблема снижения интенсивности износа гребня актуальна главным образом из-за того, что формирование нового профиля при обточках по предельному износу гребня происходит путем обращения металла поверхности катания бандажа в стружку. Например, для получения полного профиля поверхности катания колеса технологический съем металла составляет 70 — 80% от суммарного, тогда как в начале 1980-х гг. — 25 — 30% [1].

В настоящее время среди специалистов не существует единого мнения относительно причин процесса износа. Не было единого представления о нем и прежде. Исторический анализ показывает, что в прошлом резкое увеличение износа рельсов и колес подвижного состава, как правило, было связано либо с заменой видов локомотивной тяги, либо с повышением массы поездов [1]. Так было при замене паровозной тяги на тепловозную и электрическую. Позднее рост интенсивности бокового износа рельсов проявился на перевальных участках при замене электровозов на более мощные без изменения осевой нагрузки, но с одновременным повышением массы поездов. Последний значительный рост интенсивности износа наблюдается с 1985 г., характерной особенностью которого стало распространение этого явления по всей сети железных дорог. Этому предшествовало внедрение в эксплуатацию ряда технических решений: переход на ширину рельсовой колеи с 1524 на 1520 мм, с подшипников скольжения на подшипники качения и увеличение осевой нагрузки у электровозов с 23 на 25 т, у вагонов — с 21 на 23 т. За последнее время было предложено немало методов снижения интенсивности износа колес и рельсов, таких как смазка, наплавка и др. Эти методы, несомненно, снижают уровень интенсивности износа и повышают ресурс колес [1, 2], но если коэффициент трения можно уменьшить смазкой, то повышенные удельные давления в контакте «гребень — рельс» это единственный фактор, отрицательное влияние которого нельзя ликвидировать смазкой [2, 3]. Поэтому, по мнению отечественных и зарубежных специалистов, приоритетным направлением в улучшении условий взаимодействия в системе «колесо — рельс»

представляется путь ослабления напряженного состояния его элементов. Так, в программе стратегических исследований Ассоциации американских железных дорог (AAR) по снижению сил и напряжений, возникающих в инфраструктуре и подвижном составе при повышении осевых нагрузок, рассматриваются три основных аспекта достижения поставленной цели: снижение уровня поперечных сил; снижение статических и динамических (в том числе ударных) вертикальных нагрузок; снижение контактных напряжений в колесах и рельсах [1]. Поэтому исследования и поиск технических решений, направленных на снижение уровня сил взаимодействия колесной пары и пути и их износа, являются актуальными.

Цель представленной работы — исследование влияния параметров поперечного профиля поверхности катания бандажей и горизонтальных неровностей оси рельсовой колеи на взаимодействие колесной пары грузового локомотива и рельсовой колеи.

Исследования проводились методом имитационного моделирования движения колесной пары в рельсовой колее с горизонтальными геометрическими неровностями. При составлении математической модели для имитационного моделирования взаимодействия колесной пары и рельсовой колеи принят ряд допущений. Так, при изучении колебаний рельсовых экипажей нередко ограничиваются рассмотрением отдельно взятой колесной пары, несмотря на некоторые различия в движениях одиночной колесной пары и «жесткой» тележки. Дополнительное сокращение числа степеней свободы можно получить, если не учитывать жесткость в точке контакта колеса и рельса. Правомерность использования этого допущения в расчетной схеме обоснована тем, что в возмущениях со стороны пути не учтены неровности в виде ступенек и выбоин [3]. На основании изложенного из полной пространственной системы «экипаж — путь» выделена система, состоящая из одной колесной пары (например, первой) и пути, конфигурация которой с учетом принятых допущений определяется четырьмя степенями свободы. Для того чтобы принятая расчетная схема наиболее точно отражала траекторию извилистого движения колесной пары в реальных условиях, определены эквивалентные значения горизонтальных упругих связей букс колесной пары с тележкой. С использованием метода Рауса — Гурвица выполнены вычисления значений эквивалентных параметров упругих связей при условии равенства критических скоростей устойчивого движения математической модели системы «колесная пара — путь» и движения реальной колесной пары в рельсовой колее. Такая постановка задачи не отражает полностью характер движения системы, но позволяет сконцентрироваться на основных закономерностях взаимодействия в системе «колесная пара — рельсовая колея», отстранившись от влияния других многочисленных (более 60) менее значимых факторов.

Дифференциальные уравнения движения в системе «колесная пара — рельсовая колея» получены в форме уравнений Лагранжа второго рода [4], которые для неконсервативной системы имеют вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{q}_i} \right) - \frac{\delta T}{\delta q_i} + \frac{\delta \Pi}{\delta q_i} + \frac{\delta \phi}{\delta q_i} = Q_j, \quad (1)$$

где q_i — обобщенные координаты;

Q_j — обобщенные силы, не обладающие потенциалом;

T — функция кинетической энергии, составленная по теореме Кенинга;

Π — функция потенциальной энергии, составленная по теореме Клайперона;

Φ — диссипативная функция Релея.

Силы крипа определены по гипотезе Картера при равных значениях коэффициентов крипа как в поперечном, так и в продольном направлениях.

Дифференциальные уравнения движения системы «колесная пара — путь» представлены в форме, где явно выражен их квазилинейный характер:

$$\ddot{z}_{KP} + \lambda_1^2 z_{KP} = -\varepsilon \cdot \mathcal{O}(\alpha_{KP}; y_{KP}; \eta_{1,2}; z_{1,2}; z_{01,02}; \dot{z}_{1,2}; \ddot{z}_{1,2})$$

$$\ddot{\alpha}_{KP} + \lambda_2^2 \alpha_{KP} + Q_{23} y_{KP} + Q_{24} \Psi_{KP} = -\varepsilon \cdot \mathcal{O}(z_{KP}; y_{KP}; \Psi_{KP}; \eta_{1,2}; z_{1,2})$$

$$\ddot{y}_{KP} + \lambda_3^2 y_{KP} + Q_{32} \alpha_{KP} + Q_{34} \Psi_{KP} = -\varepsilon \cdot \mathcal{O}(z_{KP}; \alpha_{KP}; \Psi_{KP}; \eta_{1,2}; z_{1,2})$$

$$\ddot{\Psi}_{KP} + \lambda_4^2 \Psi_{KP} + Q_{43} y_{KP} + Q_{42} \alpha_{KP} = -\varepsilon \cdot \mathcal{O}(y_{KP}; \alpha_{KP}; \eta_{1,2}), \quad (2)$$

где ε — коэффициент, характеризующий степень нелинейности системы, в данной системе принят равным единице ($\varepsilon = 1$);

z_{KP} — координата подпрыгивания центра масс колесной пары;

α_{KP} — координата боковой качки колесной пары;

y_{KP} — координата бокового отхода колесной пары;

Ψ_{KP} — координата извилистого движения (вращение вокруг оси z) колесной пары;

$z_{1,2}; \dot{z}_{1,2}; \ddot{z}_{1,2}$ — значения амплитуд, скоростей и ускорений для волнообразных неровностей левого и правого рельса соответственно;

$\eta_{1,2}$ — горизонтальные неровности левой и правой рельсовых нитей соответственно;

$z_{01,02}$ — возвышение по уровню левой и правой рельсовых нитей соответственно.

В линейной части дифференциальные уравнения распадаются на одно независимое уравнение относительно координаты z_{KP} и три связанных между собой уравнения относительно координат α_{KP} , y_{KP} и Ψ_{KP} . В системе трех связанных дифференциальных уравнений (2) представлены все виды колебаний и возмущений: параметрические, автоколебания (извилистое движение), вынужденные и пространственные. В качестве значений динамических и геометрических параметров системы «подвижной состав — путь» приняты значения, полученные в реальных условиях на железных дорогах Сибирского региона. Значения геометрических горизонтальных неровностей рельсов приведены к оси рельсовой колеи путем простого усреднения их значений в соответствующих сечениях [5]. Следует отметить, что в реальных условиях динамические и геометрические параметры пути на различных участках могут отличаться в несколько раз.

Решения дифференциальных уравнений движения системы «колесная пара — путь» получены численным интегрированием по методу Рунге — Кутты методом статистических испытаний, который является трудоемким процессом [6]. Поэтому в дальнейших исследованиях рассматривались только режимы движения колесной пары на критической скорости извилистого движения — 25 м/с. Спектр внешних возмущений, который использован в математической модели «колесная пара — путь», состоит из горизонтальных геометрических

неровностей и возвышения по уровню с длинами волн 1,5; 3,0; 8,0 и 18,0 м, полученных при измерении магистральных путей.

Вычислена собственная длина волны извилистого движения колесной пары, которая равна 18,0 м [7], что соответствует длине волны извилистого движения колесной пары грузового электровоза в реальных условиях.

Частота извилистого движения колесной пары пропорциональна скорости ее поступательного движения. Поэтому горизонтальная неровность с длиной волны, равной $L_B = 18,0$ м, находится в постоянном резонансном соотношении с собственной частотой извилистого движения колесной пары во всем диапазоне скоростей движения экипажа. Характер возмущенного движения колесной пары по рельсовой колее оценивался путем исследований параметров траекторий ее движения (рис. 1) и амплитуд ускорений в горизонтальной плоскости (рис. 2) для трех значений конусности поверхностей катания колес ($\leq 1:10$, $\leq 1:20$ и $\leq 1:25$), а также криволинейного профиля поверхности катания типа ОмИИТ, разработанного в ОмГУПС с участием автора для электровозов ВЛ 10^у с осевой нагрузкой 25 т. Кроме того, использовались два значения начальных отклонений по координате бокового отбоя ($y_{кп} = 0$ и $y_{кп} = \pm 6$ мм) колесной пары на входе исследуемого участка пути относительно продольной оси рельсовой колеи.

По результатам имитационного моделирования установлено, что сдвиг по фазе между амплитудами траекторий рельсовой колеи и геометрического центра колесной пары (см. рис.

1а, линии 2 и 3 соответственно) составляет $0,25 \cdot L_B$ или в угловом исчислении 90° . При начальном отклонении $y_{кп} = 6$ мм и конусности $\leq 1:10$ через 25 м пройденного пути траектория движения колесной пары полностью совпадает с траекторией движения, которая не имела начального отклонения (см. рис. 1а, линии 3 и 4). Все это указывает на устойчивость возмущенного горизонтального движения колесной пары и наличие процесса синхронизации между траекториями продольной оси рельсовой колеи и колесной пары.

В скоростном и высокоскоростном движении используются значения конусности поверхности катания колес, равные $\leq 1:20$ и $\leq 1:25$ соответственно. Расчетные длины волн извилистого движения одиночной колесной пары для значений конусности $\leq 1:20$ и $\leq 1:25$ составляют 25 и 39 м. Результаты имитационного моделирования показывают, что в процессе движения колесных пар с этими значениями конусности поверхностей катания синхронизация траекторий происходит на протяжении двух волн траектории оси рельсовой колеи (см. рис. 1б, кривые 6, 7 и 2). За счет синхронизации трансформируются траектории движения колесных пар с конусами $\leq 1:20$; $\leq 1:25$, а значения их длин волн приближаются к двойному значению длины волны ($2 \times L_B = 36,0$ м) траектории оси рельсовой колеи и равны 35 и 37 м (см. рис. 1б, линии 6 и 7). В процессе дальнейшего движения колесной пары по рельсовой колее соотношения между их длинами волн сохраняются.

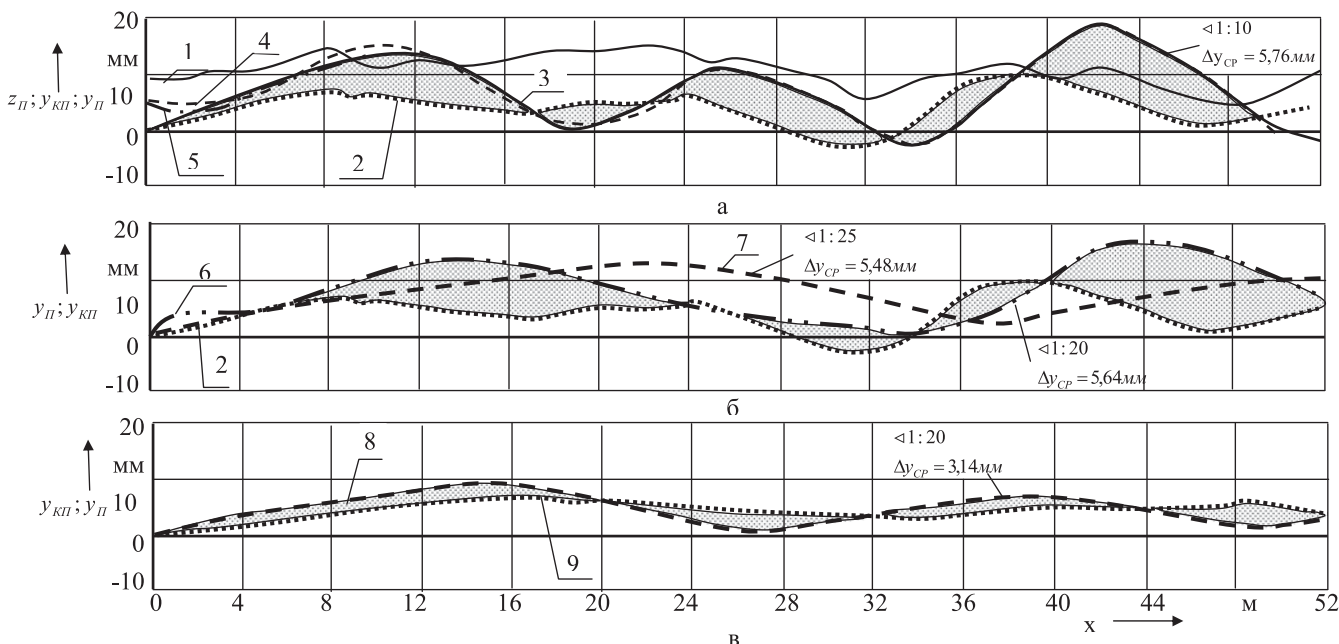


Рисунок 1 — Траектории движения колесной пары и оси рельсовой колеи относительно координаты y :

а — линии траекторий: 1 — оси рельсовой колеи по уровню (z_n); 2 — оси рельсовой колеи в плане (y_n); 3 — движения колесной пары ($y_{кп}$) с конусностью, равной $\leq 1:10$; 4 — движения колесной пары ($y_{кп}$) с конусностью $\leq 1:10$ и $y_{по} = 6$ мм; 5 — движения колесной пары ($y_{кп}$) с профилем бандажа (типа ОмИИТ);

б — линии траекторий: 2 — оси рельсовой колеи в плане (y_n); 6 — движения колесной пары ($y_{кп}$) с конусностью $\leq 1:20$; 7 — движения колесной пары ($y_{кп}$) с конусностью $\leq 1:25$;

в — линии траекторий: 8 — оси рельсовой колеи (y_n) с увеличенной в 2 раза длиной волны горизонтальных неровностей; 9 — движения колесной пары ($y_{кп}$) с конусностью $\leq 1:20$

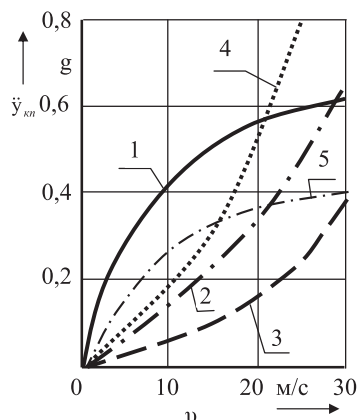


Рисунок 2 — Амплитуды ускорений колесной пары в направлении $Y_{КБ}$. Линии: 1 — конусность поверхности катания $\mu < 1:10$; 2 — $\mu < 1:20$; 3 — $\mu < 1:25$; 4 — профиль типа ОмИИТа; 5 — профиль $\mu < 1:20$ с увеличенной длиной волны горизонтальных неровностей в два раза.

В горизонтальной плоскости между значениями амплитуд траекторий извилистого движения колесной пары и оси рельсовой колеи существует разность между их координатами бокового отхода (Δy_{CP}). Для трех значений конусности бандажа ($< 1:10$; $< 1:20$ и $< 1:25$) получены средневзвешенные значения разности амплитуд (Δy_{CP}), которые равны 5,76; 5,64 и 5,45 мм соответственно. При $\Delta y_{CP} \neq 0$ колеса в колесной паре в точках контактов колес и рельсов катятся с разными диаметрами кругов катания. С использованием методики, представленной [8], для полученных значений (Δy_{CP}) определены значения разности диаметров кругов катания (Δd_{CP}) колес в колесных парах. При наличии разности диаметров кругов катания (Δd_{CP}) движение колесной пары сопровождается паразитным проскальзыванием колес по рельсам: одно колесо катится с проскальзыванием в режиме «тяги», а второе колесо — в режиме «торможения». Распределение значений длин пути паразитного проскальзывания между колесами в колесной паре может быть различным и зависит от многих факторов. Поэтому для объективной оценки проскальзывания используется сумма абсолютных значений длин скольжения обоих колес за один оборот, которые в зависимости от конусности равны 3,61; 3,54 и 3,42 мм соответственно.

Выполнены расчеты траектории движения колесной пары с конусностью, равной $< 1:20$ (см. рис. 1в, линия 9), по рельсовой колее с длиной волны оси рельсовой колеи, увеличенной в два раза (36 м) (см. рис. 1в, линия 8). В этом случае среднearифметическое смещение траектории центра колесной пары (см. рис. 1в, линия 9) относительно траектории оси рельсовой колеи уменьшилось до 3,14 мм, а суммарная длина паразитного проскальзывания колес за один оборот до 1,98 мм.

Профиль поверхности катания типа ОмИИТ имеет криволинейное очертание в виде дуги окружности с радиусом, равным 0,5 м, и увеличенным радиусом выкружки с 0,015 до 0,027 м. Поперечный профиль с радиусом, равным 0,5 м, соответствует профилю начальной стадии износа поверхности катания колеса. По результатам натурных испытаний электровазов с профилем типа ОмИИТ пробег между обточками колес увеличился на 30%. Установлена собственная длина волны извилистого движения колесной пары, равная 15 м. При на-

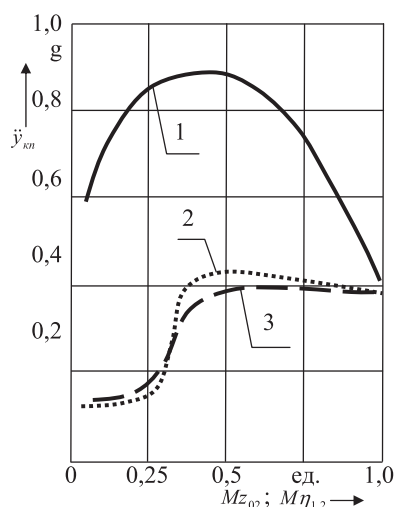


Рисунок 3 — Зависимость ускорений по координате бокового отхода колесной пары от уровня возмущений.

Линии: 1 — $M\eta_{1,2} = Mz_{02} = \text{var}$; 2 — $M\eta_{1,2} = \text{var}$, $Mz_{02} = 1$; 3 — $M\eta_{1,2} = 1$ и $Mz_{02} = \text{var}$

личии начального отклонения ($y_{КП} = 0,006$ м) процесс синхронизации траекторий колесной пары и оси рельсовой колеи (см. рис. 1а, линии 5 и 2 соответственно) осуществляется на отрезке пути, длина которого равна 2 м, или десятой части ($0,1 \times L$) длины волны траектории рельсовой колеи. Это в 12,5 раз меньше, чем у колесной пары со стандартным профилем ($< 1:10$), что свидетельствует о более жесткой синхронизации траекторий колесной пары с нелинейным профилем поверхности катания (типа ОмИИТ) и рельсовой колеи.

Зависимости значений ускорений колебаний в направлении координаты $y_{КП}$ от скорости движения представлены для трех значений конусности поверхности катания $< 1:10$; $< 1:20$; $< 1:25$ и нелинейного профиля типа ОмИИТ (см. рис. 2). Для колесных пар с конусностью $< 1:20$ и $< 1:25$ (см. рис. 2, линии 2 и 3 соответственно) наблюдается значительно меньший (в 2 — 3 раза) уровень ускорений $\ddot{y}_{КП}$ по сравнению с колесной парой со стандартной конусностью (см. рис. 2, линия 1). Для поперечных профилей поверхностей катания типа ОмИИТ и стандартного имеют место разнонаправленные соотношения между амплитудами ускорений $\ddot{y}_{КП}$: в интервале скоростей движения от 0 до 20 м/с ускорения у колесной пары со стандартным профилем выше, чем у колесной пары с профилем типа ОмИИТ, а при движении со скоростями свыше 20 м/с, наоборот, ниже.

Влияние уровня амплитуд геометрических неровностей в виде просядок по уровню ($z_{01,02}$) и отступлений оси рельсовой колеи в плане ($\eta_{1,2}$) на значения амплитуд ускорений колесной пары со стандартным профилем поверхности катания ($< 1:10$) по координате бокового отхода ($\ddot{y}_{КП}$) представлены на рис. 3. Уровень значений амплитуд неровностей задавался изменением значений масштабных коэффициентов по следующим трем вариантам: первый вариант $M_{\eta_{1,2}} = M_{z_0} = \text{var}$; второй $M_{\eta_{1,2}} = \text{var}$, $M_{z_0} = 1$; третий $M_{\eta_{1,2}} = 1$, $M_{z_0} = \text{var}$ (см. рис. 3, кривые 1, 2 и 3 соответственно). Для первого варианта ($M_{\eta_{1,2}} = M_{z_0} = \text{var}$) амплитуды неровностей рельсовой колеи имеют следующие статистические значения. Возвышение рельса по уровню: среднее статистическое значение $m_{z_0} = 11$ мм, стандартное от-

клонение $\delta_{z_0} = 3,2$ мм; по отступлениям в плане оси рельсовой колеи соответственно $m_{\eta} = 3,45$ мм и $\delta_{\eta} = 3,5$ мм. Зависимости второго и третьего вариантов (см. рис. 3, кривые 2 и 3 соответственно) имеют ступенчатую форму. Нижняя часть линий 2 и 3 соответствует движению колесной пары без касания гребней головки рельса, а верхняя часть — движению с касанием. Ступени обеих линий (2 и 3) находятся в сечении, которому соответствуют следующие абсолютные значения амплитуд неровностей: уровня — 3,2 мм, в плане — 1,2 мм. Таким образом, более существенное влияние (в 3 раза) на амплитуду извилистого движения колесной пары оказывают амплитуды неровностей в плане ($\eta_{1,2}$) рельсовых нитей в сравнении с их неровностями по возвышению ($z_{01,02}$). По первому варианту (кривая 1) в сечении $M(\eta_{1,2}; z_{02}) = 0,35$ амплитуды ускорений колебаний бокового отхода имеют максимум, равный 0,88 g. При дальнейшем увеличении уровня амплитуд неровностей наблюдается существенное снижение значений ускорений по координате ($y_{кп}$). Это снижение уровня ускорений обусловлено влиянием нелинейных пространственных связей между координатами движения исследуемой системы.

Выводы

1. На амплитуду траектории движения колесной пары наибольшее влияние (в 3 раза) оказывает амплитуда траектории оси рельсовой колеи в плане, чем амплитуда траектории возвышения по уровню рельсовой нити.

2. Извилистое движение колесной пары со стандартной конусностью ($\leq 1:10$) сопровождается паразитным проскальзыванием, абсолютная суммарная длина которого для двух колес за один оборот составляет 5,61 мм.

3. Для снижения паразитного проскальзывания колес по рельсам необходимо в эксплуатации согласовывать значения собственной длины волны извилистого движения колесной пары и длин волн горизонтальных неровностей оси рельсовой колеи. Значения длин волн этих траекторий должны быть равными и как можно длиннее.

4. Колесные пары с нелинейными профилями поверхностей катания (в том числе и с прокатом) на скоростях движения свыше 80 — 100 км/ч имеют повышенные уровни ускорений по координате бокового отхода ($\ddot{y}_{кп}$) и соответственно рамных сил и интенсивности износа колес и рельсов.

Литература

1. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса : пер. с англ. / У.Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн и др. М. : Интекст, 2002. 408 с.

2. Богданов В.М. Снижение интенсивности износа гребней колес и бокового износа рельсов // Железнодорожный транспорт. 1992. № 12. С. 30 — 34.

3. Исследование взаимодействия подвижного состава и пути с целью установления причин подреза гребней колесных пар электровоза ВЛ10У и предупреждение этого явления : отчет о НИР / Омский институт железнодорожного транспорта; руководитель М.П. Пахомов. № Г.Р 0184.0031648; Инв. № 0286. 035612. Омск, 1985. 109 с.

4. Бутенин Н. В. Введение в аналитическую механику. М. : Наука, 1971. 264 с.

5. Шилер В.В. Преобразование результатов измерения геометрических неровностей рельсовой колеи в абсолютные координаты и их передача в информационные системы // Повышение динамических качеств подвижного состава и поезда в условиях сибирского региона : сборник науч. трудов / под ред. И.И. Галиева. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2003. С. 39 — 42.

6. Ланда П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М. : Наука, 1980. 359 с.

7. Динамика вагона : учебник для вузов ж.-д. транспорта / С. В. Вершинский и др. : 2-е изд. М. : Транспорт, 1978. 352 с.

8. Проблемы выбора ширины железнодорожной колеи // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 10. С. 24 — 25.

References

1. Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i relsa [Generalization of the World Experience of Heavy-Weight Railway Traffic: The Problems of Wheel–Rail interaction]: Translated from English. / U. J. Harris, S. M. Zakharov, J. Landgren et al. M.: Intext, 2002. 408 p.

2. Bogdanov V.M. Snizhenie intensivnosti iznosa grebney koles i bokovogo iznosa relsov [Reducing the rate of wheel flanges wear and side wear of rails] // Zheleznodorozhnyy transport. 1992. No.12. P. 30 – 34.

3. Issledovanie vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i puti s tselyu ustanovleniya prichin podreza grebney kolesnykh par elektrovoza VL10U i preduprezhdenie etogo yavleniya [Studying the interaction of rolling stock and tracks to determine the cause of wheelset flange undercutting of VL10U electric locomotive and prevent this phenomenon]: R&D Report / Omsk Institute of Railway Transport; Curator M.P. Pakhomov. State registration No. 0184.0031648; Inv. No. 0286. 035612. Omsk, 1985. 109 p.

4. Butenin N. V. Vvedenie v analiticheskuyu mekhaniku. [Introduction to analytic mechanics] M.: Nauka. Chief editorial house of physical and mathematical publications, 1971. 264 p.

5. Shiler V.V. Preobrazovanie rezultatov izmereniya geometricheskikh nerovnostey relsovoy kolei v absolutnyye koordinaty i ikh peredacha v informatsionnyye sistemy [Converting results of measurements of rail track geometrical irregularities to absolute coordinates and their transfer to the information systems] // Povyshenie dinamicheskikh kachestv podvizhnogo sostava i poezda v usloviyakh sibirskogo regiona: sb. nauchnykh trudov [Increasing the dynamic properties of rolling stock and train in the Siberian region: Collection of scientific works] / Edited by I.I. Galieva. Omsk: Publishing house OmGUPS, 2003. P. 39 – 42.

6. Landa P. S. Avtokolebaniya v sistemakh s konechnym chisлом stepeney svobody. [Natural oscillations in systems with finite number of degrees of freedom] M.: Nauka, 1980. 359 p.

7. Dinamika vagona [Rail car dynamics]: textbook for rail transport universities / S. V. Vershinskiy [et al.]: 2nd edition. M.: Transport, 1978. 352 p.

8. Problemy vybora shiriny zheleznodorozhnoy kolei [The problems of selecting railway gauges] // Put i putevoe khozyaystvo. 2008. No.10. P. 24–25.

УДК 629.4.015:629.42:625.1.03

Алексей Олегович Захаров, начальник сектора тягово-энергетических лабораторий ПКБ ЦТ — филиала ОАО «РЖД» (ПКБ ЦТ ОАО «РЖД»), Москва

Дмитрий Николаевич Пикалов, ведущий инженер ПКБ ЦТ — филиала ОАО «РЖД» (ПКБ ЦТ ОАО «РЖД»), Москва

Михаил Юрьевич Пустоветов, кандидат технических наук, доцент, и. о. директора НИИЦ «Криотрансэнерго» ФГБОУ ВПО РГУПС, Ростов-на-Дону

Петр Владимирович Страшко, заведующий лабораторией измерительно-вычислительных систем и автоматизации измерений НИИЦ «Криотрансэнерго» ФГБОУ ВПО РГУПС, Ростов-на-Дону

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ЗАГРУЖЕННОСТИ ПО СЦЕПЛЕНИЮ ЛОКОМОТИВОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Alexei O. Zakharov, Head of Traction & Energy Laboratories of PKB CT - subsidiary of JSC «RZhD»

Dmitri N. Pikalov, Senior Engineer of PKB CT - subsidiary of JSC «RZD»

Mikhail Yu. Pustovetov, PhD in Engineering, Associate Professor, Acting Director of NIITS «Kriotransenergo» FGBOU VPO RGUPS,

Pyotr V. Strashko, Head of Measurement and Computing Systems and Measurement Automation Laboratory of NIITS «Kriotransenergo» FGBOU VPO RGUPS

Regarding Determination Of Adhesion Load Mode Of Locomotives With Asynchronous Traction Drive

Аннотация

Предложена относительно простая методика определения режима загрузки локомотивов по сцеплению на основе статистического критерия Фишера. Методика опробована на результатах опытных поездок с электровозом 2ЭС10 на Свердловской железной дороге.

Ключевые слова:

расчетный коэффициент сцепления, коэффициент тяги, грузовой локомотив, критерий Фишера, тренд.

Abstract

A relatively simple method for determining the mode of locomotive adhesion load based on statistical Fisher measure. Technique is tested on the results of trial runs with electric locomotive 2ES10 on the Sverdlovsk railway.

Keywords:

calculated adhesion coefficient, traction coefficient, freight locomotive, Fisher measures, trend.

В связи с вводом в эксплуатацию на железных дорогах России грузовых локомотивов с асинхронным тяговым приводом (АТП) (электровоз постоянного тока 2ЭС10, тепловоз 2ТЭ25А) стала актуальной задача установления критических норм масс (КНМ) поездов на участках эксплуатации новых локомотивов. Один из критериев, по которым в настоящее время устанавливается КНМ для электровозов с коллекторными тяговыми двигателями, — режим загрузки локомотива по сцеплению [1]. Согласно [1, 2], различают четыре режима загрузки локомотива по сцеплению: экономный, рациональный, интенсивный и недопустимый. К сожалению, [1] устанавливает численные значения критериев проскальзывания колесных пар локомотива для разграничения режимов загрузки локомотива по сцеплению лишь для ограниченного количества эксплуатируемых на момент ввода в действие документа серий электровозов постоянного и переменного тока. Таким образом, положения [1] неприменимы к автономным локомотивам и локомотивам с АТП.

Специалистами ПКБ ЦТ и РГУПС предлагается оценивать режим загрузки локомотивов по сцеплению на основании сравнения кривой расчетного коэффициента сцепления ψ_k для конкретного типа локомотива и полученных в результате опытных поездок кривых расчетного коэффициента тяги $\psi_{ТК}$. Допустим, что кривая ψ_k соответствует рациональному режиму загрузки локомотива по сцеплению. Коэффициент тяги ψ_T определяется как отношение реализуемой в каждый момент времени локомотивом силы тяги к сцепной массе локомотива. ψ_k — предельное значение ψ_T [3]. Получить $\psi_{ТК}$ можно в виде тренда путем статистической обработки измеренных значений ψ_T по выражению вида (1), выбирая коэффициенты A, B, C, D, E ,

$$\psi_{TK} = A + \frac{B}{C + D \cdot v} - E \cdot v, \quad (1)$$

где v — скорость движения поезда.

Допустимо использовать скорость движения локомотива. Это тем более справедливо для АТП, так как он в существенно меньшей степени склонен к боксованию по сравнению с коллаторным приводом ввиду плавного регулирования и большей жесткости механических характеристик, а также благодаря поосному регулированию силы тяги.

В основе методики оценки режима загрузки локомотивов по сцеплению лежит статистический односторонний критерий Фишера [4], позволяющий оценить, можно ли считать сравниваемые выборочные дисперсии s_1^2 и s_2^2 оценками одной и той же генеральной дисперсии. Иными словами, критерий позволяет выяснить для заданного уровня значимости p , можно ли считать, что набор числовых значений, полученных одним способом, и набор числовых значений, полученных другим способом (ψ_{TK} и ψ_K), являются описанием одного и того же процесса (сцепления колес локомотива с рельсами). Более конкретно количественно при помощи критерия Фишера и качественно путем анализа расположения кривой ψ_K относительно кривой ψ_{TK} в функции v решается задача о степени совпадения этих двух кривых. На основании этого делается вывод о режиме работы локомотива в смысле загрузки по сцеплению.

Для $\psi_{TK}(v)$ выборочная дисперсия s_{TK}^2 рассчитывается по выражению [3]

$$s_{TK}^2 = \frac{1}{n_{TK} - 1} \left(\sum_{i=1}^{n_{TK}} \psi_{TKi}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{TK}} \psi_{TKi} \right)^2}{n_{TK}} \right), \quad (2)$$

а для $\psi_K(v)$ выборочная дисперсия s_K^2

$$s_K^2 = \frac{1}{n_K - 1} \left(\sum_{i=1}^{n_K} \psi_{Ki}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_K} \psi_{Ki} \right)^2}{n_K} \right), \quad (3)$$

где индексы ТК или К соответственно означают принадлежность к расчетному коэффициенту тяги или расчетному коэффициенту сцепления;

n — число наблюдений;

i — порядковые номера наблюдений.

Для правомерности использования одностороннего критерия Фишера необходимо, чтобы $s_1^2 > s_2^2$. В связи с этим если $s_{TK}^2 > s_K^2$, то принимаем $s_1^2 = s_{TK}^2$ и $s_2^2 = s_K^2$, если $s_K^2 > s_{TK}^2$, то $s_1^2 = s_K^2$ и $s_2^2 = s_{TK}^2$. В случае $s_{TK}^2 = s_K^2$ выбор кандидатуры на роль s_1^2 не имеет значения.

Уровень значимости — это оценка, характеризующая возможное количество ошибок в серии испытаний, т. е. сопоставлений кривых $\psi_{TK}(v)$ и $\psi_K(v)$. Например, $p=0,05$ означает, что рискуем ошибиться в 5 из 100 испытаний.

Односторонний критерий Фишера представляет собой выражение

$$\frac{s_1^2}{s_2^2} \leq F_{1-p}(n_1 - 1, n_2 - 1), \quad (4),$$

где $F_{1-p}(n_1 - 1, n_2 - 1)$ — табличное [4] или вычисленное значение квантиля Фишера.

Электронные таблицы Excel позволяют вычислить значение квантиля Фишера при помощи встроенной статистической функции ФРАСПОБР.

Делать выводы о загрузке локомотива по сцеплению предлагается следующим образом для анализируемого интервала скоростей движения.

Если неравенство (4) неверно и при этом график $\psi_{TK}(v)$ проходит не выше графика $\psi_K(v)$, то локомотив работает в экономном режиме загрузки по сцеплению.

Если неравенство (4) верно и при этом график $\psi_{TK}(v)$ проходит не выше графика $\psi_K(v)$, то локомотив работает в рациональном режиме загрузки по сцеплению.

Если неравенство (4) верно и при этом график $\psi_{TK}(v)$ полностью или частично проходит выше графика $\psi_K(v)$, то локомотив работает в интенсивном режиме загрузки по сцеплению.

Если неравенство (4) неверно и при этом график $\psi_{TK}(v)$ полностью или частично проходит выше графика $\psi_K(v)$, то локомотив перегружен по сцеплению, т. е. КНМ завышена для данных условий эксплуатации, что соответствует недопустимому режиму эксплуатации локомотива.

Выражения, описывающие для локомотивов с АТП зависимости $\psi_K(v)$, на настоящий момент отсутствуют в [5]. Для электровоза ЭЭС10 аналитическое выражение и графический вид $\psi_K(v)$ приведены в [6]. При $v > 5$ км/ч зависимость близка к линейной. Это тем более справедливо при рассмотрении не полного диапазона скоростей, а отдельных его интервалов.

В ходе опытной поездки в функции времени t или пройденного пути S фиксируются сила тяги и v . На основании этих данных строятся зависимости $\psi_K(t)$ и $\psi_T(t)$ или $\psi_K(S)$ и $\psi_T(S)$. Для более подробного анализа выбираются те участки, где наблюдается близость значений ψ_T и ψ_K . Причем если значения близки, но очевидно, что все мгновенные значения ψ_T расположены не выше значений ψ_K , то режим загрузки по сцеплению не превосходит рациональный. В этих случаях можно проводить анализ на выявление того, рациональный режим наблюдается или экономный. Особый интерес представляют участки, где все значения ψ_T или некоторые из них расположены выше значений ψ_K . Такие случаи отбираются для более подробного анализа. Отметим, что возможно такое расположение точек ψ_T вокруг линии ψ_K , когда без использования математических методов не представляется возможным надежно установить режим загрузки по сцеплению (рис. 1, фрагменты III и IV).

В ноябре 2012 г. силами ОАО «ВНИИЖТ» при участии представителей ПКБ ЦТ и РГУПС проводились опытные поездки с электровозом ЭЭС10 на Свердловской железной дороге с целью установления КНМ на участках Екатеринбург — Дружинино, Екатеринбург — Каменск-Уральский, Екатеринбург — Пермь и в обратных направлениях.

При рассмотрении совокупно большого количества измеренных в опытных поездках значений ψ_T для случаев близкого расположения зависимостей $\psi_K(t)$ и $\psi_T(t)$ выявлено, что распределение значений ψ_T подчиняется нормальному закону.

Так как, с одной стороны, средствами распространенных электронных таблиц Excel затруднительно получить для множества значений ψ_T тренд $\psi_{TK}(v)$ в виде (1), а с другой стороны, для всех рассмотренных по итогам опытных поездок случаев диапазон изменения скорости движения позволяет считать график $\psi_K(v)$ близким к прямой, то допустимо получить график $\psi_{TK}(v)$ в виде линейного тренда.

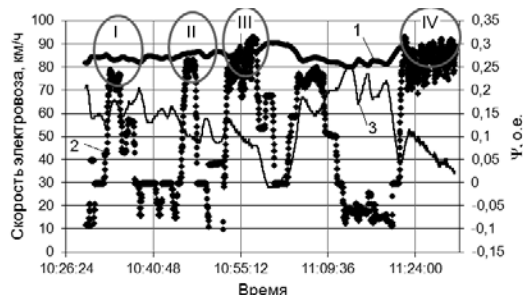


Рисунок 1 — Зависимости ψ_K (жирная кривая 1), ψ_T (точки 2), тонкая кривая 3 — скорость электровоза в функции астрономического времени для части поездки Екатеринбург — Пермь от 13 ноября 2012 г. с поездом массой 6249 т

Для иллюстрации практического использования предлагаемого метода оценки режима загрузки электровоза с АТП по сцеплению рассмотрим результаты поездки Екатеринбург — Пермь от 13 ноября 2012 г. с поездом массой 6249 т. На рис. 1 выделены четыре фрагмента, интересных для рассмотрения. Отрицательные значения ψ_T соответствуют тормозным режимам электровоза (в данной статье не анализируются).

Фрагмент I. Проанализирована совокупность из 115 точек ψ_T (рис. 2).

Участок соответствует 1752 — 1751 км перегона Билимбай — Бойцы (подъем до 9‰, кривые, минимальный радиус кривой 630 м). При анализе $\psi_{TK}(v)$ и $\psi_K(v)$ получили

$$\frac{s_1^2}{s_2^2} = 4,046 > 1,363. \text{ Здесь } F_{0,95}(114,114) = 1,363 \text{ — значение}$$

квантиля Фишера. Выводы: различие значимое, $\psi_{TK}(v)$ проходит ниже $\psi_K(v)$, режим загрузки по сцеплению экономный.

На рис. 2 — 5 для соответствующих фрагментов рис. 1 показаны в функции скорости локомотива: 1 — ψ_K (жирная кривая); 2 — ψ_T (точки); 3 — ψ_{TK} (тонкая прямая).

Фрагмент II. Проанализирована совокупность из 63 точек ψ_T (см. рис. 3). Участок соответствует 1739,8 — 1739 км перегона Бойцы — Коуровка (подъем до 8,8‰, кривые, минимальный радиус кривой 620 м). При анализе $\psi_{TK}(v)$ и $\psi_K(v)$ полу-

$$\text{чили } \frac{s_1^2}{s_2^2} = 1,017 < 1,524. \text{ Здесь } F_{0,95}(62,62) = 1,524 \text{ — значение}$$

квантиля Фишера. Выводы: различие незначимое, $\psi_{TK}(v)$ проходит ниже $\psi_K(v)$, режим загрузки по сцеплению рациональный.

Фрагмент III. Проанализирована совокупность из 219 точек ψ_T (см. рис. 4). Участок соответствует 1732,9 — 1730 км перегона Коуровка — Кузино (конец расчетного подъема,

множественные кривые, минимальный радиус кривой 633 м).

При анализе $\psi_{TK}(v)$ и $\psi_K(v)$ получили $\frac{s_1^2}{s_2^2} = 42,793 > 1,250$. Здесь

$F_{0,95}(218,218) = 1,250$ — значение квантиля Фишера. Выводы: различие значимое, $\psi_{TK}(v)$ пересекает $\psi_K(v)$, режим загрузки по сцеплению недопустимый.

Фрагмент IV. Проанализирована совокупность из 503 точек ψ_T (см. рис. 5). Участок соответствует 1706,8 — 1698,1 км перегона Сабик — Сарга (часть расчетного подъема, множественные кривые, минимальный радиус кривой 590 м). При

анализе $\psi_{TK}(v)$ и $\psi_K(v)$ получили $\frac{s_1^2}{s_2^2} = 6,107 > 1,158$. Здесь

$F_{0,95}(502,502) = 1,158$ — значение квантиля Фишера. Выводы: различие значимое, $\psi_{TK}(v)$ проходит ниже $\psi_K(v)$, режим загрузки по сцеплению экономный.

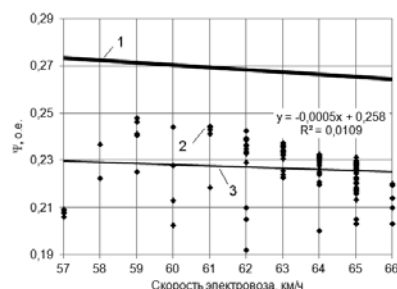


Рисунок 2 — Зависимости от скорости локомотива ψ_K , ψ_T и ψ_{TK} для фрагмента I рис. 1

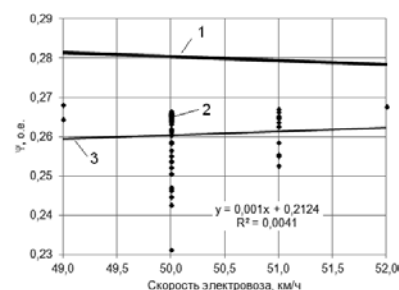


Рисунок 3 — Зависимости от скорости локомотива ψ_K , ψ_T и ψ_{TK} для фрагмента II рис. 1

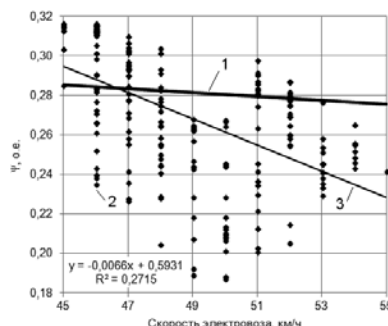


Рисунок 4 — Зависимости от скорости локомотива ψ_K , ψ_T и ψ_{TK} для фрагмента III рис. 1

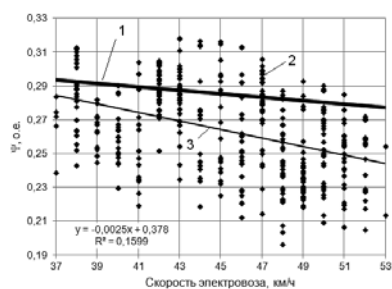


Рисунок 5 — Зависимости от скорости локомотива ψ_k , ψ_T и ψ_K для фрагмента IV рис. 1

При построении средствами Excel тренда $\psi_{TK}(v)$ возможно вывести на экран его уравнение и R^2 — коэффициент детерминации, говорящий о том, в какой мере данный тренд объясняет расположение исходных точек ψ_T (см. рис. 2 — 5). Из приведенных в статье примеров видно, что для линейных трендов величина R^2 невелика. Она несколько увеличивается при использовании трендов, описываемых уравнениями второго порядка или уравнениями вида (1). Можно, повысив порядок уравнения тренда или подобрав сложную функцию, получить довольно высокое значение R^2 . Но при этом график $\psi_{TK}(v)$ будет представлять кривую с множественными локальными экстремумами, возможно, многократно пересекающую график $\psi_K(v)$. Возникает проблема, как интерпретировать прохождение кривой $\psi_{TK}(v)$ относительно $\psi_K(v)$. Сложная функция $\psi_{TK}(v)$ оказывается ничуть не лучше исходного множества точек ψ_T для оценки режима загруженности локомотива по сцеплению. Таким образом, по мнению авторов, нет смысла стремиться к высокому значению R^2 , усложняя геометрию кривой $\psi_{TK}(v)$. Аппроксимация множества точек ψ_T прямой линией $\psi_{TK}(v)$, получаемая в виде тренда средствами Excel, является наилучшим вариантом аппроксимации в заданном классе функций (линейных). При этом имеем весьма наглядное представление взаимного положения $\psi_{TK}(v)$ и $\psi_K(v)$.

Литература

1. Временная методика и инструкция по проведению опытных поездок для определения критических норм масс грузовых поездов при электровозной тяге : Утв. замминистра путей сообщения РФ А.Н. Кондратенко 29.03.95.
2. Мугинштейн Л.А., Лисицын А.Л. Нестационарные режимы тяги (Сцепление. Критическая норма массы поезда). М. : Интекст, 1996. 176 с.
3. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов : учебник для студентов техникумов и колледжей ж.-д. тр-та. М. : УМК МПС России, 2000. 592 с.
4. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М. : Наука, 1968. 288 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транспорт, 1985, 287 с.
6. Экспериментальное определение коэффициента сцепления колес электровоза 2ЭС10 с рельсами / В.А. Кучумов, Р.В. Мурзин, Н.С. Охотников, Я.Б. Кудрявцев // Транспорт Урала. 2012. № 1(32). С. 114 — 118.

Следует отметить, что режимы загруженности электровозов по сцеплению, описанные в [1, 2], интересны с точки зрения установления КНМ не сами по себе, а в связи с тем, что тесно связаны с повреждаемостью оборудования локомотива, количеством растяжек поездов, затратами на ремонт и содержание локомотивного и путевого хозяйства. Для надежной и достоверной взаимной увязки всех этих характеристик с показателями проскальзывания колесных пар, значениями коэффициента тяги, каким-либо иным критерием в случае новых локомотивов, в том числе с АТП, требуется проанализировать значительный массив статистической информации, накапливаемый в процессе эксплуатации. В связи с этим важно, чтобы статистика могла быть собрана в возможно краткий срок, чему, по нашему мнению, отвечает представленный в настоящей статье метод.

Заключение

Предложен относительно простой метод оценки режима загруженности локомотива с АТП по сцеплению на основании статистической обработки данных опытных поездок с использованием известного математического аппарата и распространенного программного обеспечения.

Применение статистического критерия для оценки режима загруженности локомотива по сцеплению дает возможность автоматизировать этот процесс.

Реализация предлагаемого метода допускает использование скорости локомотива, что позволит оперативно собрать значительный объем статистической информации с бортовых регистраторов. Допустима обработка данных по одной секции локомотива.

В случае проведения опытной поездки с тягово-энергетическим вагоном-лабораторией предлагаемый метод позволяет минимизировать количество измерительных каналов для определения режима загруженности локомотива по сцеплению. Требуется измерять скорость движения поезда по показаниям расторможенной колесной пары вагона-лаборатории, а также силу тяги на автосцепке вагона. При этом силу тяги на автосцепке следует пересчитывать в касательную силу тяги локомотива.

References

1. Vremennaya metodika i instrukcia po provedeniu opytnykh poezdok dlya opredelenia kriticheskikh norm mass gruzovykh poezdov pri elektrovoznoy tyage [Temporary method and instructions for trial runs for determining critical mass norms of freight trains with locomotive traction.] Approved by the Deputy Minister of Railways of the Russian Federation A.N. Kondratenko on 29.03.1995.
2. Muginshteyn L.A., Lisitsyn A.L. Nestatsionarnye rezhimy tyagi (Stsepleniye. Kriticheskaya norma massy poezda). [Nonstationary traction modes (Adhesion. Train critical mass norm).] M.: Intekst, 1996. 176 p.
3. Osipov S.I., Osipov S.S. Osnovy tyagi poezdov [Train traction fundamentals]: textbook for students of technical schools and colleges of railway transport. M.: UMM MPS of Russia, 2000. 592 p.
4. Pustynnik E.I. Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniye. [Statistical methods for observations analysis and processing] M.: Nauka, 1968. 288 p.
5. Pravila tyagovykh raschyotov dlya poezdnoy raboty. [Traction calculation rules for train operation.] M.: Transport, 1985, 287 p.
6. Eksperimentalnoye opredeleniye koeffitsienta stsepleniya kolyos elektrovoza 2ES10 s relsami [Experimental determination of wheel-track adhesion coefficient of electric locomotive 2ES10] / V.A.Kuchumov, R.V. Murzin, N.S.Okhonnikov, Ya.B. Kudryavtsev // Transport of the Urals. 2012. No. 1(32). P. 114 – 118.

УДК 629.47: 629.48

Виктор Александрович Смирнов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО РЕМОНТУ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ РАБОТЕ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Viktor A. Smirnov, Associate Professor of «Electric Railways Rolling Stock» Chair, FGBOU VPO Omsk State Transport University (OmGUPS), PhD in Engineering

Functional Model Of Rolling Stock Repair Shop For Operation In Modern Environment

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы ремонта подвижного состава, анализируются тенденции развития ремонтного производства на железнодорожном транспорте, предлагается функциональная модель и критерии оценки эффективности работы предприятия в современных условиях.

Ключевые слова:

ремонт подвижного состава, функциональная модель предприятия, технологическая система производства, критерии оценки эффективности.

Abstract

The paper addresses rolling stock repair issues; development trends in railway transport repair industry are analyzed; functional model and criteria for evaluating the performance of enterprise in the modern environment are suggested.

Keywords:

repair of rolling stock, functional model of enterprise, technological production system, performance evaluation criteria.

Введение

Качественный ремонт подвижного состава — важнейший фактор обеспечения надежности и безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Основная задача предприятий ремонтного комплекса ОАО «РЖД» — обеспечение требуемых показателей безопасности движения, надежности и технической готовности подвижного состава компании при экономически оправданном уровне финансовых затрат.

Произошедшие за последние десятилетия организационные, экономические и технологические изменения на железнодорожном транспорте существенно изменили условия работы ремонтных предприятий. В их числе следует отметить:

- формирование конкурентного сегмента рынка ремонта подвижного состава;
- интенсивное обновление вагонного и локомотивного парка, появление принципиально новых узлов и агрегатов в конструкции;
- сокращение объемов ремонта по причине увеличения межремонтных пробегов и, как следствие, недозагрузка производственных мощностей депо в целом;
- ужесточение требований к качеству ремонта и нормам простоя со стороны операторов подвижного состава;
- активное внедрение новых технологий в ремонтное производство, повышение квалификационных требований к персоналу на фоне ухудшения ситуации на кадровом рынке квалифицированных рабочих и технических специалистов в целом;
- появление новых участников процесса в лице заводов — изготовителей железнодорожной техники, возрастание роли фирменного обслуживания в системе ремонта;
- более жесткие внешнеэкономические и правовые условия, усиление государственного контроля и надзора в области экологии, охраны труда и безопасности на транспорте.

Перечисленные факторы оказывают существенное влияние на модель функционирования предприятия в конкурентной среде, требуют уточнения критериев оценки эффективности деятельности и методик оптимизации.

1. Граф-модель предприятия по ремонту подвижного состава

Основным фактором, определяющим успешность работы предприятия на рынке услуг по ремонту подвижного состава, является мера удовлетворенности потребителей, в качестве которых выступают операторы подвижного состава: локомотивные эксплуатационные депо, транспортные компании. В условиях финансово-хозяйственного разделения эксплуатации и ремонта подвижного состава экономические интересы участников процесса в части ремонта и технического обслуживания диаметрально различны. Для компании-оператора принципиальное значение имеет рост производительности, пробега, наработки единиц подвижного состава при одновременном снижении затрат на его ремонт и обслуживание. С точки зрения второй стороны ремонт рассматривается как источник дохода. Баланс интересов определяется текущим состоянием рынка спроса и предложения.

Функциональная модель предприятия по ремонту подвижного состава при работе в современных условиях может быть представлена в виде схемы (рис. 1).

Вершинами графа являются структурные параметры, характеризующие уровень технологии производства, ресурсное, кадровое, материально-техническое обеспечение, текущее состояние регионального рынка ремонта подвижного состава, финансовую и техническую политику руководства, совокупность которых определяет показатели работы предприятия в конкретных рыночных условиях. Ребра графа формируют систему внутренних связей параметров модели.

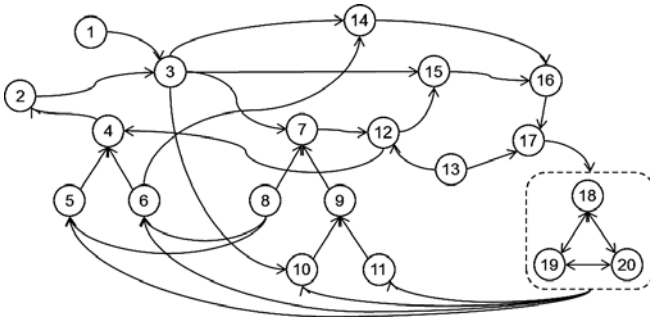


Рисунок 1 — Граф-модель предприятия по ремонту подвижного состава

2. Структурные параметры и взаимосвязи модели

Производственная программа ремонтного предприятия $N_p(a_3)$ определяется внутренней корпоративной потребностью $N_p^{соб}(a_1)$ и сторонними заказами операторов подвижного $N_p^{рын}(a_2)$. Величину корпоративного заказа можно принять величиной условно-постоянной, в определенных пределах не зависящей от показателей работы предприятия. Возможный объем стороннего заказа определяется составом и количеством единиц подвижного состава, находящихся в собственности или операционном управлении сторонних операторов, преимущественными местами дислокации корпоративного парка по районам погрузки и выгрузки, маршрутами перевозок и номенклатурой грузов, а также привлекательностью размещения заказа на данном предприятии (a_4).

Максимальная программа ремонта $N_p^{(max)}$ ограничена технологическими возможностями производства, наличием необходимых ресурсов, площадей, путевого развития, накопителей и кадрового обеспечения. Возможные годовые объемы не должны превышать

$$N_p = N_p^{соб} + N_p^{рын} \cdot K \leq N_p^{(max)}, \quad (1)$$

где K — ожидаемая доля конкурентного рынка.

Решение о предпочтении в выборе того или иного предприятия в условиях свободного рынка принимается из соображений максимизации выигрыша в качестве (a_5) и стоимости ремонта с учетом транспортных расходов и упущенной выгоды от простоя подвижного состава (a_6) [1]

$$\tau_{тр} \cdot \Delta l_{т} + c_{то} \cdot \Delta l_{т} + c_{yb} \cdot \Delta t_p < E_p + E_k, \quad (2)$$

где $\tau_{тр}$, $\Delta l_{т}$, $c_{то}$, c_{yb} — транспортный тариф, дальность пересылки, стоимость станционного обслуживания (дополнительные отцепки, отстой, дополнительная маневровая работа по формированию) и потери упущенных возможностей из-за увеличения простоя Δt_p при ремонте соответственно; E_p и E_k — выигрыш в стоимости и качестве ремонта.

Удельная себестоимость ремонта $c_p(a_7)$ складывается из затрат на материалы и комплектующие в соответствии с принятой технологией (a_8) и ресурсной составляющей (a_9), включающей в себя постоянные производственные затраты (a_{11}) и переменные накладные расходы (a_{10}), зависящие от объемов производства и загрузки производственных мощностей,

$$c_p = c_p^{МК} + c_p^p + c_p^H \left(\frac{N_p}{N_p^{(max)}} \right) \in [c_{min}, c_{max}]. \quad (3)$$

Наличие вариативной части объясняет факт зависимости себестоимости от программы ремонта вида $c_p = a/N_p + b$, где a и b — величины расходов на ремонт подвижного состава.

Ресурсная составляющая зависит от технологии производства, кадрового обеспечения, производственной инфраструктуры ($a_{18} - a_{20}$), включающей в себя основные производственные, вспомогательные и административно-бытовые здания, сооружения, производственные территории, инженерные сети, коммуникации и оборудование. Численные значения параметров могут быть приняты на основании действующих калькуляций затрат предприятия и ожидаемого прогноза изменения отдельных статей расходов после внедрения нового оборудования или технологий, изменений в системе оплаты труда и мотивации персонала [2, 3].

Рыночная цена ремонта (a_{12}) формируется с учетом плановой рентабельности производства (a_{13}), которая для вагоноремонтных депо ОАО «РЖД» составляет 35%, для частных ремонтных предприятий заметно ниже, около 15%, и в зависимости от уровня конкуренции может варьироваться в большую или меньшую сторону.

Взаимосвязь затрат на материалы и комплектующие со временем и качеством ремонта определяется экспертным методом. Ускорение времени ремонта обусловлено сокращением объема ремонтно-восстановительных операций за счет замены изношенных деталей на новые. Например, на пред-

приятных DB (Германия) и SNCF (Франция) не производится ремонт буксовых подшипников, восстановление наплавкой деталей тормозной рычажной передачи, ремонт полюсной системы электрических машин и ряд других операций, обладающих высокой трудоемкостью и требующих значительных вложений в технологическую оснастку [4].

Доходность ремонтного производства (a_{16}) определяется как разность выручки, полученной от ремонта подвижного состава (a_{15}) и ущерба от отказов подвижного состава в эксплуатации по причине некачественного ремонта. Для покрытия последнего необходимо создание резервного страхового фонда (a_{14}) [5]

$$E_p^{(сф)} = q^E \cdot [w^E(c_p) \cdot N_p + r(w^E, N_p)] \quad (4)$$

где q^E — средний размер финансового ущерба ремонтного предприятия из-за отказов подвижного состава в гарантийный период, включая затраты на внеплановый ремонт и штрафные санкции в случае сбоев в перевозочном процессе; w^E — среднегодовой параметр потока отказов подвижного состава после ремонта, снижается по мере роста затрат на ремонт до момента естественного ограничения на уровне, определяемом конструктивной надежностью отдельных узлов и агрегатов, при наличии достаточного объема данных зависимость $w^E(c_p)$ может быть задана аналитически; r — слагаемое, учитывающее дополнительные издержки на страхование рисков для обеспечения заданной вероятности неразорения ремонтного предприятия,

$$r = \sqrt{N_p \cdot x_a \cdot w^E(1) \cdot (1 - w^E(1))}, \quad (5)$$

где x_a — квантиль вероятности неразорения, который для гауссовского приближения центрированной и нормированной величины суммарного годового ущерба $\Phi(x)$ может быть найден как решение уравнения

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \alpha, \quad (6)$$

где α — заданная вероятность неразорения (например, равная 0,9 — 0,95).

При расчете финансового ущерба q^E учитываются претензии и штрафы со стороны операторов подвижного состава и других участников перевозочного процесса в адрес ремонтного предприятия при возникновении неисправностей в гарантийный период, а также затраты на внеплановый ремонт или замену отказавшего оборудования [4].

Размер прибыли определяет объем собственного инвестиционного фонда предприятия (a_{17}), который может быть потрачен на приобретение и модернизацию оборудования, реконструкцию производственной инфраструктуры, улучшение условий труда, социальные и стимулирующие выплаты производственному персоналу. Распределение средств зависит от политики руководства, принятой стратегии развития предприятия, целей и предполагаемых путей их реализации. В качестве критериев оптимизации используются значения удельной ресурсоемкости технологических процессов, интегральные показатели уровня технологического развития производства и качества ремонта [6]. Задача выбора оптималь-

ного плана модернизации для различных сценариев развития ремонтного предприятия и объема инвестиционного фонда может быть решена методами линейного целочисленного программирования [7].

Описанная функциональная модель предприятия по ремонту подвижного состава имеет сложную структуру с внутренними обратными связями взаимного влияния элементов модели — параметров и показателей деятельности. Для решения частных задач требуется упрощение или декомпозиция графа путем разбиения исходного множества элементов графа на несколько подмножеств по функциональному признаку и замены отдельных связей соответствующими ограничениями.

3. Критерии оценки

Комплексная оценка предприятий выполняется по одному из показателей эффективности. В общем случае под эффективностью понимается оценочная характеристика результата какого-либо процесса (например, функционирования, использования, управления, развития и т. д.), отражающая степень достижения поставленной цели.

Критерии эффективности в экономической литературе формулируются по-разному: максимум результата при оптимальной величине затрат, максимум результата при минимуме затрат, максимум результата на единицу затрат, минимум затрат на единицу результата. По типу объекта расчета различают следующие виды эффективности: производственной деятельности, капитальных вложений, использования ресурсов, новой техники и другие [8].

Один из наиболее часто применяемых критериев оценки эффективности промышленных предприятий — рентабельность продукции, рассчитываемая как процентное отношение прибыли, полученной от реализации товаров или услуг, к себестоимости. Использование данного критерия для оценки деятельности предприятий по ремонту подвижного состава с точки зрения интересов собственника представляется вполне корректным при условии включения в затратную часть резервного фонда страхования рисков.

Задача оптимизации в этом случае заключается в выборе сочетания удельных затрат и коэффициента качества ремонта, обеспечивающих максимальное значение рентабельности $R(c_p, w^E) \rightarrow \max$ при соответствующих ограничениях

$$K_T \geq K_T^{(TY)}, \quad \forall t_{p,i} \leq t_{p,i}^{(pl)}, \quad \forall H_{p,i} \geq H_{p,i}^{(pl)}, \quad (7)$$

где $K_T, K_T^{(TY)}$ — фактический и нормативный коэффициент технической готовности подвижного состава;

$t_{p,i}^{(pl)}$ — фактическое и нормативное время простоя подвижного состава на каждом виде ремонта;

$H_{p,i}, H_{p,i}^{(pl)}$ — фактический и нормативный регламент технологических операций по каждому виду ремонта соответственно.

Особенностью производственного комплекса железнодорожного транспорта является тесная взаимосвязь отдельных технологических систем в рамках единого перевозочного процесса. В соответствии с этим основными функциями предприятия по ремонту подвижного состава являются восстановление надежности оборудования до требуемого уровня по показателям безотказности в эксплуатации, соблюдение заданных сроков и объемов ремонта. Результативность выпол-

нения каждой из функций при наличии соответствующих данных экономического анализа может быть оценена в денежном выражении.

На практике получение интересующей информации в полном объеме не представляется возможным в силу ее отсутствия, искажения или ограничений в доступе, а сам расчет представляется неоправданно трудоемким.

В качестве возможного критерия комплексной оценки эффективности предприятия введем показатель функциональной полезности ремонта, рассчитываемый по статистическим данным как отношение дохода, полученного от эксплуатации единицы подвижного состава на интервале средней наработки до отказа, к сумме затрат на ремонт и упущенной выгоды от простоя на время ремонта

$$u_p = \frac{T^E(m) \cdot A}{c_p + A \cdot T(t_p)} \rightarrow \max, \quad (8)$$

где c_p — цена ремонта;

t_p — время ремонта;

A — средний доход на единицу наработки подвижного состава (для грузовых вагонов может быть рассчитан по доходной ставке грузовых перевозок);

$T(t_p)$ — наработка подвижного состава за интервал времени t_p ;

$T^E(m)$ — средняя наработка на отказ,

$$T^E(m) = \frac{t_{np}}{z(t_{np})}, \quad (9)$$

где t_{np} — суммарная наработка подвижного состава, тыс. км; $z(t_{np})$ — число отказов на отрезке от m до t , произошедших за суммарную наработку.

Средние значения величин, входящих в расчетное выражение (8), могут быть взяты по статистическим данным финансовой отчетности компании оператора (A , см. [1]), нормативным, расчетным или прогнозируемым показателям безотказности и ремонтпригодности подвижного состава (T^E , S_p , t_{pr} см. [1, 2]).

Литература

1. Смирнов В.А., Семенов А.М., Хомутских В.И. Стратегическое планирование вагоноремонтного производства с учетом рыночных рисков // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 39 — 44.
2. Вагонное хозяйство : учебник для вузов ж.-д. транспорта / П.А. Устич, И.И. Хаба, В.А. Ивашов и др.; под ред. П.А. Устича. М. : Маршрут, 2003. 560 с.
3. Смирнов В.А., Талызин А.С. Энергосбережение при ремонте и техническом обслуживании локомотивов // Известия Транссиба. 2011. № 4.
4. Организация текущего ремонта подвижного состава на железных дорогах Великобритании // Железнодорожный транспорт за рубежом: локомотивное и вагонное хозяйство. Подвижной состав / ЦНИИТЭИ. 2001. Вып. 3 — 4.
5. Смирнов В.А., Кузнецов В.Ф., Семенов А.М. Выбор показателей технологического оснащения предприятий по ремонту железнодорожного подвижного состава с учетом рисков безопасности движения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 1.
6. Смирнов В.А., Кузнецов В.Ф., Семенов А.М. Планирование модернизации и реконструкции предприятий транспортного машиностроения // Транспорт Урала. 2010. № 2 (25). С. 7 — 11.
7. Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1981. 560 с.
8. Анализ эффективности деятельности предприятия : учебное пособие / И.И. Мазурова, Н.П. Белозерова, Т.М. Леонова, М.М. Подшивалова. СПб. : Изд-во СПбГУЭФ, 2010. 113 с.

References

1. Smirnov V.A., Semenov A.M., Khomutskikh V.I. Strategicheskoe planirovanie vagonoremontnogo proizvodstva s uchetom rynochnykh riskov [Strategic planning of car-repair works with account to market risks] // Transport of the Urals. 2011. No. 4 (31). P. 39–44.
2. Vagonnoye khozyaistvo [Rolling Stock]: textbook for railway transport universities / P.A. Ustich, I.I. Khaba, V.A. Ivashov et al.; edited by P.A. Ustich. M.: Marshrut, 2003. 560 p.
3. Smirnov V.A., Talyzin A.S. Energoberezhenie pri remonte i tekhnicheskoy obsluzhivaniy lokomotivov [Energy efficiency in the repair and maintenance of locomotives] // Izvestiya Transsiba. 2011. No. 4.
4. Organizatsiya tekushchego remonta podvizhnogo sostava na zheleznnykh dorogakh Velikobritanii [Organization of routine maintenance of rolling stock at UK railways] // Zheleznodorozhny transport za rubezhom: lokomotivnoye i vagonnoye khozyaistvo. Podvizhnoy sostav [Railway transport abroad: locomotives and cars. Rolling stock. / TsNIITEI. 2001. Issue 3 – 4.
5. Smirnov V.A., Kuznetsov V.F., Semenov A.M. Vybory pokazateley tekhnologicheskogo osnasheniya predpriyatiy po remontu zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava s uchetom riskov bezopasnosti dvizheniya [Selecting technological equipment parameters of rolling stock repair enterprises, taking into account traffic safety risks] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2012. No. 1.
6. Smirnov V.A., Kuznetsov V.F., Semenov A.M. Planirovanie modernizatsii i rekonstruktsii predpriyatiy transportnogo mashinostroeniya [Planning modernization and reconstruction of transport engineering enterprises] // Transport of the Urals. 2010. No. 2 (25). P. 7–11.
7. Kiny R., Raifa H. Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zamesheniya [Decision making at numerous criteria of preference and substitution]: translated from English. M.: Radio i svyaz, 1981. 560 p.
8. Analiz effektivnosti deyatel'nosti predpriyatiya [Analysis of effectiveness business activities]: textbook / I.I. Mazurova, N.P. Belozerovala, T.M. Leonova, M.M. Podshivalova. SPb.: Publishing house SPbGUEF, 2010. 113 p.

УДК 629.19

Валерий Васильевич Харин, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по НР и ИР Курганского института железнодорожного транспорта,
Александр Константинович Остапчук, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Общепрофессиональные дисциплины» Курганского института железнодорожного транспорта,
Евгений Юрьевич Рогов, начальник отдела информатизации Курганского института железнодорожного транспорта,
Виктор Евгеньевич Овсянников, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инноватики и менеджмента качества Курганского государственного университета

ПОВЫШЕНИЕ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИЦЕПА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Valery V. Kharin, PhD, associate professor, deputy director of Kurgan Railway Institute

Alexander K. Ostapchuk, PhD, Head of "Overall vocational disciplines"

Evgeniy Yu. Rogov, head of IT Department, Kurgan Railway Institute

Viktor E. Ovsyannikov, PhD, senior lecturer of "Innovations and quality management" Chair, Kurgan Railway Institute

Active Safety Improvement Of A Car Trailer

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы тормозной динамики автопоезда без общего тормозного привода применительно к прицепам категории О1 и О2 и пути повышения активной безопасности прицепа в целом системы «автомобиль — прицеп». Предложены математические модели торможения в продольной плоскости движения и в плане. Показана причина потери устойчивости системы «автомобиль — прицеп» в режиме торможения. Предложены принципиальные рекомендации по технической реализации устройств тормозной системы прицепа, которые позволяют наиболее полно реализовать потенциальные тормозные свойства прицепа. Реализация предложенных технических решений позволит повысить активную безопасность прицепа с тормозом наката.

Ключевые слова: автопоезд, торможение, устойчивость, соединительная головка, прицеп, силы инерции, тормозная сила, динамика, категория.

Abstract

In article questions of brake dynamics of a road train without the general brake drive with reference to trailers of the category О1 and О2 and a way of increase of active safety of the trailer as a whole avtomobil-pritsep systems are considered. Mathematical models of braking in the longitudinal plane of movement and in the plan are offered. The reason of loss of stability of avtomobil-pritsep system in a braking mode is shown. Basic recommendations about technical realization of devices of brake system of the trailer which allow to realize potential brake properties of the trailer most fully are offered. Realization of the offered technical solutions will allow to increase active safety of the trailer with a brake dead floor.

Keywords: road train, braking, stability, connecting head, trailer, forces of inertia, brake force, dynamics, category.

Активная безопасность автопоезда — свойство предотвращать или уменьшать вероятность ДТП. Важнейшим элементом в системе «автомобиль — прицеп», который влияет на активную безопасность, является тормозная система.

Согласно классификации транспортных средств (ТС), применяемой в рамках Женевского соглашения от 1958 г. в соответствии со Сводной резолюцией о конструкции транспортных средств, приняты следующие обозначения категорий ТС [1 — 4]: категория М — механическое транспортное средство для перевозки пассажиров (в этой категории M_1, M_2, M_3); категория N — механическое транспортное средство для перевозки грузов (в этой категории N_1, N_2, N_3); категория О — прицепы и полуприцепы (в этой категории O_1, O_2, O_3, O_4). Принципиально допустима любая комбинация «автомобиль — прицеп» при разумных сочетаниях автомобилей категории М и N с прицепом. Естественно, ограничения накладываются на соотношение полных масс автомобиля и прицепа. Так, невозможна комбинация автомобиля категории N_2 с полной массой до 3,5 т и прицепа категории O_4 с полной массой более 10 т. Разумная комбинация автомобилей и прицепов возможна при выполнении соотношений $M_{na}/M_{nn} > 1$, где M_{na} и M_{nn} — полная масса автомобиля и прицепа соответственно.

Для комбинаций автомобилей категории N_2 и N_3 и прицепов O_3 и O_4 в настоящее время хорошо отработаны тормозные системы всего автопоезда. Пневматический привод тормозной системы таких прицепов можно рассматривать как составную часть пневматического привода рабочей тормозной системы автомобиля-тягача. Поэтому в силу совершенства тормозной системы таких автопоездов не возникает, как правило, опасной ситуации на всех режимах торможения, включая режим аварийного торможения. Но такое совершенство тормозных свойств прицепа обеспечивается сложной и дорогой тормозной системой и сложными соединительными элементами между приводами тормозной системы автомобиля и прицепа.

Следует отметить, что если тормозной привод автомобиля является гидравлическим, то из-за возможной разгерметизации его во время стыковки с тормозным приводом прицепа в настоящий момент в мировом автостроении не существует комбинаций «тормозной гидравлический привод автомобиля» и «привод тормозной системы прицепа». Таким образом, на прицепе возможна тормозная система, привод которой является составной частью привода автомобиля-тягача только в том случае, если привод рабочей тормозной системы автомобиля является пневматическим.

В настоящее время мировое автостроение ежегодно производит 55 млн автомобилей в год, из них 45 млн — легковых. Известно, что тормозная система легкового автомобиля всегда имеет гидравлический привод. Поэтому автомобили категории M_1 (легковые автомобили) не могут иметь объединенного тормозного привода с прицепом, когда необходима комбинация «автомобиль категории M_1 + прицеп». Сказанное полностью относится и к существенной части грузовых автомобилей. Так, на автомобилях полной массой до 3,5 т (категория N_1) тормозной привод всегда гидравлический. Гидравлический привод используется и на значительной части автомобилей категории N_2 .

Таким образом, только на 10 — 12% всех автомобилей (это категории N_2, N_3) существует пневмопривод. При этом до 90% остальных автомобилей (это в первую очередь легковые) не могут иметь объединенный с прицепом тормозной привод. Поэтому существующие прицепы для автомобилей категории M_1 и N_1 или не имеют своей тормозной системы, или она крайне несовершенна по тормозным качествам. Так, практически все прицепы категории O_1 (с полной массой не более 750 кг) лишены тормозной системы, а на прицепах категории O_2 (с полной массой более 750 кг, но не более 3,5 т) тормозная система представляет некий суррогат из тормозных механизмов и тормозного привода (тормоз наката инерционного типа), срабатывающего при накатывании прицепа на тормозящий автомобиль. На рис. 1 представлена схема сил при замедлении автопоезда, у которого прицеп имеет тормозную систему.

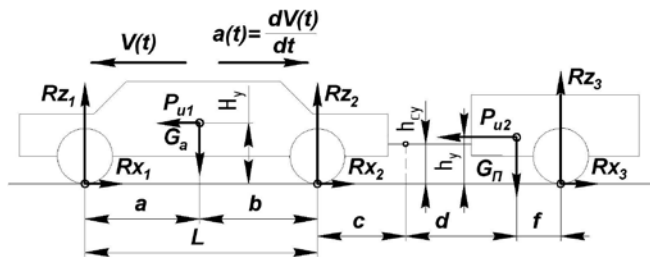


Рисунок 1 — Схема сил, действующих на автомобиль и прицеп при торможении:

P_{u1}, P_{u2} — силы инерции автомобиля и прицепа (приложены в центре масс); R_{zi} — вертикальные реакции со стороны дороги на соответствующую ось; R_{xi} — силы сцепления колес с дорогой (тормозные силы); G_a, G_n — вес автомобиля и прицепа соответственно; H_y, h_y, h_{cy} — высота центра масс автомобиля, прицепа и расстояние от дороги до тягово-сцепного устройства соответственно

Рассмотрим динамику торможения прицепа с использованием схемы (рис. 2).

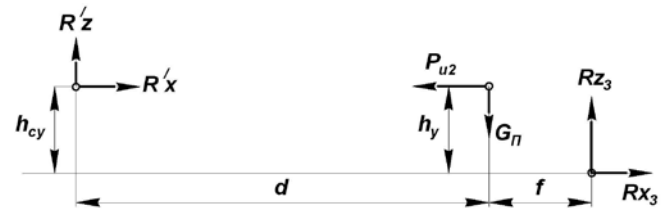


Рисунок 2 — Схема сил, действующих на прицеп при торможении: R'_z, R'_x — реакции в сцепном устройстве

Горизонтальная реакция в тягово-сцепном устройстве (соединительной головке)

$$R'_x = P_{u2} - R_{x3} \quad (1)$$

Сила сцепления R_{x3} (тормозная сила прицепа) определяется выражением

$$R_{x3} = R_{z3} \times \varphi_x,$$

где φ_x — коэффициент сцепления колеса прицепа с дорогой в продольном направлении.

Окончательно

$$R'_x = m_n \times \frac{dV(t)}{dt} - R_{z3} \times \varphi_x,$$

где m_n — масса прицепа.

Сумма моментов относительно сцепного устройства

$$R_{z3}(d + f) + R_{z3} \times \varphi_x \times h_{cy} + m_n \times (h_y - h_{cy}) \times \frac{dV(t)}{dt} - G_n \times d = 0.$$

Вертикальная реакция на колесе прицепа

$$R_{z3} = \frac{G_n \times d - m_n \times (h_y - h_{cy}) \times \frac{dV(t)}{dt}}{d + f + \varphi_x \times h_{cy}}.$$

Остальные реакции:

$$R_{x3} = R_{z3} \times \varphi_x = \frac{G_n \times d - m_n \times (h_y - h_{cy}) \times \varphi_x \times \frac{dV(t)}{dt}}{d + f + \varphi_x \times h_{cy}};$$

$$R'_x = m_n \times \frac{dV(t)}{dt} - \frac{G_n \times d - m_n \times (h_y - h_{cy}) \times \varphi_x \times \frac{dV(t)}{dt}}{d + f + \varphi_x \times h_{cy}};$$

$$R'_z = \frac{G_n \times (f + \varphi_x \times h_{cy}) - m_n \times (h_y - h_{cy}) \times \frac{dV(t)}{dt}}{d + f + \varphi_x \times h_{cy}}.$$

Представленные дифференциальные уравнения приобретают более простые соотношения, если рассматривается прицеп с центральной осью категории O_1 (без тормозной системы), для которого $f=0$. Примем $h_{cy}=h_y$. Тогда реакции R'_x и R'_z примут простые выражения:

$$R'_x = m_n \times \frac{dV(t)}{dt};$$

$$R'_z = 0.$$

Силы, действующие при торможении автомобиля (прицеп заменен реакциями R''_x и R''_z), приведены на рис. 3.

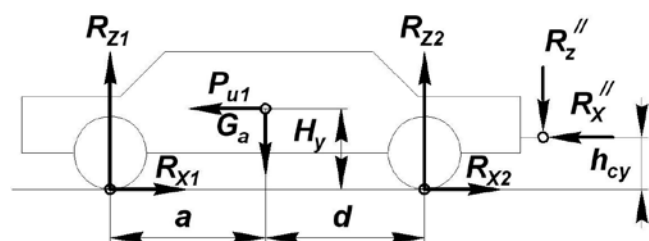


Рисунок 3 — Силы, действующие на автомобиль при торможении

Из приведенной на рис. 3 схемы интерес представляют реакции на задних колесах, так как их значения определяют потерю устойчивости. Для реакции

$$R_{z2} = \frac{G_n \times a - m_a \times H_y \times \frac{dV(t)}{dt} - R_x'' \times h_{cy}}{L}.$$

Из этого выражения видно, что величина реакции R_{z2} уменьшается не только из наличия второго члена числителя (как у одиночного автомобиля), но и из-за действия прицепа (R_x''). В то же время уменьшение вертикальной реакции R_{z2} при торможении увеличивает вероятность блокировки задних колес. Но блокирование задних колес снижает коэффициент поперечного сцепления ϕ_y колеса с дорогой практически до нуля. Такой режим качения колес заднего моста с большой вероятностью приводит к поперечному заносу автомобиля, а для системы «автомобиль — прицеп» — к складыванию автопоезда.

Уменьшение вертикальной реакции R_{z2} — не единственная причина складывания автопоезда. Рассмотрим модель в плане автопоезда с прицепом O_1 без тормозной системы (рис. 4).

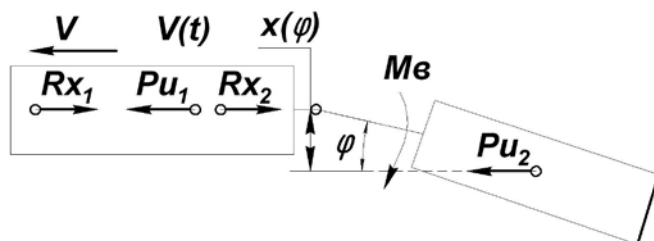


Рисунок 4 — Схема сил в плане, действующих на автопоезд: R_{x1} , R_{x2} — суммарные силы сцепления передних и задних колес автомобиля; ϕ — угол отклонения прицепа от прямолинейного движения при складывании автопоезда; $X(\phi)$ — текущее плечо; M_B — возмущающий момент

Из приведенной схемы:

$$\begin{aligned} R_{x1} + R_{x2} &= P_{u1} + P_{u2}; \\ R_z &= R_{x1} + R_{x2} - P_{u1}, \end{aligned}$$

где R_z — эквивалентная реакция, действующая на автомобиль.

Из последних выражений следует, что R_z и P_{u2} образуют пару сил с текущим плечом $X(\phi)$, что приводит к появлению возмущающего момента M_B , направленного на складывание автопоезда. Таким образом, рассмотренные факторы показывают, что при интенсивном торможении и отсутствии тормозной системы на прицепе появляется большая вероятность складывания автопоезда, что может неизбежно привести к ДТП.

Существующие конструкции тормозной системы в прицепах категории O_1 и O_2 в качестве приводной силы в тормозном приводе реализуют силу горизонтального взаимодействия между автомобилем и прицепом (реакция R_x' на рис. 2). При этом инерционная система прицепа включает в себя управляющее устройство, тормозной привод и колесные тормоза. Управляющее устройство инерционной тормозной системы состоит из комплекта деталей, интегрированных с тягово-сцепным устройством (соединительной головкой). В целом такую систему нередко обозначают как тормоз наката инерционного типа.

Тормоз наката используется, как правило, на прицепах с центральной осью. Прицеп с центральной осью — это буксируемое транспортное средство, оборудованное буксировочным устройством, которое не может перемещаться вертикально относительно прицепа и ось колес которого расположена (при равномерной загрузке) вблизи центра масс транспортного средства таким образом, что на тягач передается незначительная вертикальная статическая нагрузка, не превышающая 10% максимального веса прицепа, или 10 кН (в зависимости от того, какая величина меньше).

Наличие тормозной системы в виде тормоза наката у прицепа улучшает динамику торможения автопоезда. Однако полностью устранить приведенные выше причины, способствующие потере устойчивости автопоезда, такая конструкция тормозной системы принципиально не может. Эта генетическая принципиальность заключается в том, что для работы тормозной системы с тормозом наката обязательно наличие силы R_x' (см. рис. 2). Более того, с появлением на прицепе такой тормозной системы возникает проблема возникновения продольных колебаний прицепа относительно автомобиля в процессе торможения.

Интенсивные продольные колебания способны привести к потере устойчивости автопоезда. Кроме того, существует еще один серьезный недостаток прицепа с тормозом наката. Так, при экстренном (аварийном) торможении темп нарастания толкающего усилия со стороны прицепа на автомобиль таков, что максимальное значение усилия достигает 6 кН и больше при полной массе прицепа 750 кг. Такое торможение, как показывают испытания, почти всегда заканчивается складыванием автопоезда.

Отмеченные недостатки можно устранить, если тормоз наката заменить принципиально новым решением. Для этого необходимо решить следующие задачи

1. Прицеп должен иметь собственный запас энергии для торможения.
2. Электрическая и механическая стыковка прицепа с автомобилем должны быть не сложнее существующих.
3. Управление тормозами прицепа в процессе торможения должно осуществляться за счет небольших сил взаимодействия между прицепом и автомобилем и электрическим сигналом торможения на автомобиле. Согласно требованиям к управляющим устройствам инерционных тормозов всех типов, пороговое усилие Ka при накате прицепа на управляющем устройстве должно находиться в пределах [5]

$$0,02 \text{ gMnn} \leq Ka \leq 0,04 \text{ gMnn}.$$

Максимальная сжимающая сила, прилагаемая к соединительной головке при накате прицепа на автомобиль

$R''_x \leq 0,1gMnn$, а максимальная тяговая (растягивающая) сила должна находиться в пределах

$$0,5gMnn \leq R'_x \leq 0,1gMnn.$$

Последние два требования необходимо свести до соотношения $R'_x \approx R''_x \rightarrow Ka$.

4. Конструкция тормозной системы должна отвечать нормам ГОСТ 4364-81, ГОСТ 22895-77 и Правилам ЕЭК ООН № 13.

Несложное выражение (1) позволяет определить диапазоны устойчивости автопоезда при торможении. Если $P_{u2} < R_{x3}$, то в соединительной головке появляется растягивающая сила R'_x , а в системе «автомобиль — прицеп» — стабилизирующий момент $M_{ст}$, препятствующий складыванию автопоезда. При $P_{u2} > R_{x3}$ прицеп накатывается на автомобиль, появляется сжимающая сила R''_x в соединительной головке и, как следствие, — возмущающий момент $M_{в}$, направленный на складывание автопоезда (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что устойчивость автопоезда возрастает с удалением точки N вправо, что эквивалентно увеличению растягивающей силы R'_x . Физически это означает, что часть тормозного усилия автомобиля обеспечивается тормозной силой R_{x3} прицепа. Но это снижает в целом эффективность торможения автопоезда. Поэтому диапазон $0 — N$ должен быть значительным, как в требованиях [5]. В пределе $R'_x \rightarrow Ka_{min}$ при этом наиболее полно реализуются потенциальные тормозные свойства прицепа, а в целом — автопоезда. Но такое условие может обеспечить управляющее устройство в соединительной головке с высоким быстродействием и точностью.

Недостаточная точность и быстродействие управляющего устройства может перевести режим торможения автопоезда из

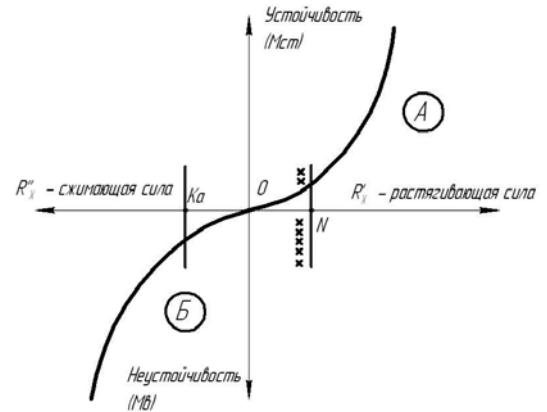


Рисунок 5 — График с зонами устойчивости при торможении автопоезда: А и Б — зоны устойчивости и неустойчивости соответственно

устойчивой зоны А в неустойчивую Б (см. рис. 5). Наиболее вероятно такое событие для экстренного (аварийного) торможения, при этом темп нарастания $M_{в}$ может превысить скорость реакции водителя, что приведет к складыванию автопоезда. С целью обеспечения устойчивости и эффективности торможения на всех режимах управляющее устройство для зоны Б должно обеспечить условие $R'_x \rightarrow Ka_{min}$. Таким образом, активная безопасность автопоезда в составе прицепов O_1 и O_2 будет в значительной мере определяться качеством выполнения всех элементов тормозной системы прицепа: управляющего устройства, тормозного привода и колесных тормозов.

Литература

1. Рябчинский А.И., Кисуленко Б.В., Морозова Т.Э. Регламентация активной и пассивной безопасности автотранспортных средств : учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений М. : Издательский центр «Академия», 2006. 432 с.
2. Сводная резолюция о конструкции транспортных средств (СР. 3), пересмотр 1, включая поправки 1, 2, 3 / ООН, 1997.
3. Соглашение о введении глобальных технических правил для колесных транспортных средств, предметов, оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах (Глобальное соглашение 1998 г.) / ООН, 1998.
4. Соглашение о принятии единообразных технических предписаний для колесных транспортных средств, предметов, оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях взаимного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний (Женевское соглашение 1958 г.), пересмотр 2 / ООН, 1995.
5. ГОСТ Р 41.13-2007 (Правила ЕЭК ООН № 13). Единообразные предписания, касающиеся транспортных средств категории М, N и O в отношении торможения.

References

1. Ryabchinsky A.I., Kisulenko B.V., Morozov T.E. Regulation of active and passive safety of vehicles : a grant for the students. M. : Publishing center «Akademiya», 2006. 432 p.
2. The summary resolution on a design of vehicles (Cf. 3), revision 1, including amendments 1, 2, 3 / United Nations, 1997.
3. The agreement on introduction of global technical rules for wheel vehicles, subjects, the equipment and parts which can be established and/or used on wheel vehicles (The global agreement of 1998) / United Nations, 1998.
4. The agreement and adoption of uniform technical instructions for wheel vehicles, subjects, the equipment and parts which can be established and/or used on wheel vehicles, and about conditions of mutual recognition of the approval which is given out on the basis of these instructions (The Geneva agreement of 1958), revision 2 / United Nations, 1995.
5. Regulation № 13 Uniform provisions concerning the approval of vehicle of categories M, N and O with regard to braking, (MOD).

УДК 621.311.6:621.316.722

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, действительный член АЭН РФ, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Владислав Федорович Григорьев, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Анна Викторовна Бондаренко, старший преподаватель кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Екатерина Михайловна Азарова, ассистент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ АГРЕГАТЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Boris A. Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor of "Transport Power Supply" Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT), Member of the Academy of Economic Sciences of the Russian Federation,
Vladislav F. Grigoriev, PhD in Engineering, Professor of "Electric Machinery" Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT),
Anna V. Bondarenko, Senior Lecturer of "Electric Machinery" Chair, Ural State University of Railway Transport (USURT),
Ekaterina M. Azarova, Assistant of "Electric Machinery" Chair, USURT

Study Of Harmonic Components Of Currents In Transformer Unit Of Electrified AC Railways

Аннотация

Рассмотрен однофазный режим работы силового трансформатора в схеме питания контактной сети переменного тока при несимметричной нагрузке фаз. В электрической схеме замещения системы питания контактной сети двухпутного участка нагрузкой силового трансформатора является электровоз постоянного тока или другие потребители подобного рода, имеющие выпрямительные установки, наличие которых обуславливает появление несимметричных периодических токов как в системе электроснабжения, так и в самом силовом трансформаторе. Приведены формулы для расчета гармонических составляющих в силовом трансформаторе.

Анализ процессов, происходящих в электрических схемах с преобразователями, обычно выполняется кусочно-линейным методом, в статье для анализа применяется метод гармонического анализа, когда правой частью дифференциальных уравнений являются эквивалентные ЭДС, а решение дифференциальных уравнений получено непосредственно в виде тригонометрических рядов Фурье.

Ключевые слова: силовой трансформатор, гармонические составляющие токов, однофазная несимметричная нагрузка, схема замещения, тригонометрический ряд.

На железных дорогах РФ, электрифицированных на переменном токе, распространено питание контактной сети с помощью трехфазных трансформаторов, соединенных по схеме $Y/\Delta-11$ (рис. 1) [1, 2].

На тяговой подстанции с двумя силовыми трансформаторами Т1 и Т2 возможны следующие режимы работы трансформаторов и соответственно схемы питания контактной сети.

1. Однофазный режим работы силовых трансформаторов (независимое питание секций контактной сети), при котором

Abstract

Single-phase operation mode of power transformer in the feed circuit of AC overhead contact system has been considered with asymmetrical phase load. Load of the power transformer in equivalent circuit of the overhead power supply system in double-track section is represented by DC locomotive or other consumers of this type with rectifier units, the presence of which causes appearance of asymmetric periodic currents both in the power supply system, and in the power transformer. Formulae for the calculation of harmonic components in power transformer are provided.

Analysis of the processes occurring in electrical circuits with transformer is generally performed using a piecewise linear method [2]; the article analyzes the use of harmonic analysis method, where the right-hand side of differential equations are equivalent EMFs, and the solution of differential equations is obtained directly in the form of Fourier trigonometric series.

Keywords: power transformer, harmonics components of currents, single-phase unbalanced load, equivalent circuit, trigonometric series.

первая секция контактной сети 1скс питается от фазы «а» трансформатора Т1, а вторая секция контактной сети 2скс — от фазы «с» трансформатора Т2. Разъединители сборных шин $P_{сш}$ и разъединители нейтральной вставки контактной сети $P_{нв}$ отключены.

2. Двухфазный режим работы силовых трансформаторов (совместное питание секций контактной сети), при котором разъединители $P_{сш}$ включены, а разъединители $P_{нв}$ отключены. Трансформаторы могут работать параллельно или раздельно. При раздельном питании один из трансформаторов питает обе

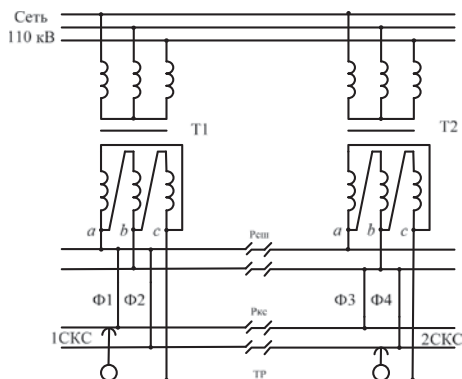


Рисунок 1 — Схема питания контактной сети двухпутного участка

секции контактной сети, а другой отключен и находится в «резерве». В обоих случаях (при параллельной или при раздельной работе) в зависимости от поездной ситуации трансформаторы работают в однофазном или двухфазном режимах. Схема совместного питания секций контактной сети в системе тягового электроснабжения переменного тока является основной схемой, применяемой в эксплуатации.

Рассмотрим процессы в системе электроснабжения, изображенной на рис. 1 для однофазного режима работы силового трансформатора Т1, когда первая секция контактной сети питается от фазы «а» трансформатора ТР1. Разъединители сборных шин Р_{сш} и разъединители нейтральной вставки контактной сети отключены [3 — 5].

При исследованиях примем следующее:

а) пренебрегаем током холостого хода силового трансформатора и выпрямительного трансформатора электроваза, так как величина этих токов составляет $I_0 = (2 - 8)\% I_{1н}$;

б) в исследуемом режиме трансформатор работает при несимметричной нагрузке фаз, электромагнитные процессы в каждой фазе трехфазного трансформатора с соединением обмоток Y/Δ можно рассматривать независимо как процессы в трех однофазных трансформаторах [2].

С учетом перечисленного электрическая схема замещения системы питания контактной сети ИСКС двухпутного участка при однофазной нагрузке силового трансформатора Т1 будет иметь вид, представленный на рис. 2.

В электрической схеме замещения приняты следующие обозначения:

e_a, e_b, e_c — ЭДС вторичных обмоток силового трансформатора; Z_{K1}' — полное сопротивление приведенной первичной обмотки силового трансформатора, $Z_{K1}' = Z_K / k_1^2$, где k_1 — коэффициент трансформации силового трансформатора, Z_K — полное сопротивление первичной обмотки силового трансформатора; Z_2 — полное сопротивление вторичной обмотки силового трансформатора; Z — полное сопротивление фидера Ф1; Z_{BK} — полное сопротивление первичной и приведенной вторичной обмотки выпрямительного трансформатора электроваза; E_0' — приведенное значение противо-ЭДС нагрузки, $E_0' = k_2 E_0$, где k_2 — коэффициент трансформации выпрямительного трансформатора; Z_3' — приведенное полное сопротивление цепи нагрузки $Z_3' = k_2^2 Z_3$.

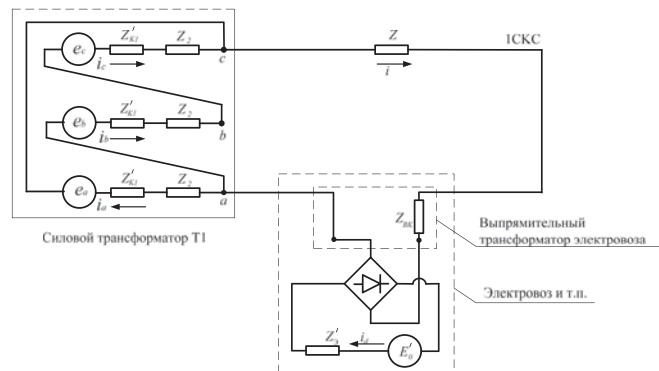


Рисунок 2 — Электрическая схема замещения системы питания контактной сети двухпутного участка при однофазной нагрузке силового трансформатора

В схеме замещения нагрузкой является электроваз постоянного тока с выпрямительной установкой, что обуславливает появление несинусоидальных периодических токов в исследуемой схеме.

Качественный анализ процессов, происходящих в электрической схеме с преобразователем, обычно ведется кусочно-линейным методом, когда составляются линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами [6]. В статье для расчета электрической схемы замещения применен метод гармонического анализа, когда решение дифференциальных уравнений представлено непосредственно в виде тригонометрических рядов. При использовании данного метода существенно упрощается расчет эксплуатационных характеристик (коэффициенты искажения, пульсации и т. д.).

Уравнения, описывающие электромагнитные процессы в схеме замещения, имеют вид:

$$x_s \frac{di_1}{d\omega t} + r_s i_1 = e_1(\omega t);$$

$$x_s \frac{di_2}{d\omega t} + r_s i_2 = e_2(\omega t);$$

$$id = i_1 = i_2;$$

$$i = i_1 - i_2; i_a = \frac{2i}{3}; i_b = -\frac{i}{3}; i_c = -\frac{i}{3},$$

где i_d — выпрямленный ток в силовой цепи электроваза; i_a, i_b, i_c — фазные токи вторичной обмотки силового трансформатора;

$e_1(\omega t), e_2(\omega t)$ — эквивалентные ЭДС источника питания (силового трансформатора) и противо-ЭДС нагрузки (электроваза и т. п.),

$$e_1(\omega t) = E_a \sin \omega t - E_0;$$

$$e_2(\omega t) = -E_a \sin \omega t - E_0;$$

$$r_s = r_{s1} + r + r_{BK} + r_3';$$

где $r_{s1} = \frac{2}{3}(r_k' + r_2)$ — эквивалентное активное сопротивление

трансформатора Т1;

$r_{BK} = r_{1BK} + r_{2BK}$ — активное сопротивление выпрямительного трансформатора электроваза;

r — активное сопротивление фидера Ф1;

r_3' — приведенное активное сопротивление нагрузки (электроваза);

где $x_{\gamma 1} = \frac{2}{3}(x'_{\kappa} + x_2)$ — эквивалентное индуктивное сопротивление

ние трансформатора Т1;

$x_{\text{БК}} = x_{1\text{БК}} + x'_{2\text{БК}}$ — индуктивное сопротивление выпрямительного трансформатора электровоза;

x — индуктивное сопротивление фазы «а»;

x'_3 — приведенное индуктивное сопротивление нагрузки (электровоза).

Эквивалентные ЭДС $e_1(\omega t)$, $e_2(\omega t)$ представляют собой периодические функции с периодом 2π .

Временные диаграммы эквивалентных ЭДС и токов i_1 , i_2 , i_d рассматриваемого режима работы (непрерывный выпрямленный ток) представлены на рис. 3.

Пределы существования эквивалентных ЭДС без учета коммутации вентилей:

$$e_1(\omega t) = E_a \sin \omega t - E_0 \text{ при } \psi < \omega t < \pi + \psi;$$

$$e_2(\omega t) = -E_a \sin \omega t - E_0 \text{ при } \psi + \pi < \omega t < 2\pi + \psi,$$

где ψ — начальная фаза, определяемая из равенства $E_a \sin \psi = E_0$ (см. рис. 3).

Эквивалентные ЭДС $e_1(\omega t)$, $e_2(\omega t)$ представим в виде тригонометрических соотношений:

$$e_1(\omega t) = \frac{a_{01}}{2} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^N a_{1m} \cos m\omega t + \sum_{n=1,3,5,\dots}^N b_{1n} \sin n\omega t;$$

$$e_2(\omega t) = \frac{a_{02}}{2} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^N a_{2m} \cos m\omega t + \sum_{n=1,3,5,\dots}^N b_{2n} \sin n\omega t.$$

При расчете коэффициентов тригонометрических рядов пренебрегаем углом коммутации вентилей выпрямителя нагрузки, тогда коэффициенты a_{01} , a_{02} , a_{1m} , a_{2m} , b_{1m} , b_{2m} — коэффициенты ряда Фурье и могут быть рассчитаны по следующим формулам [7]:

$$a_{01} = a_{02} = \frac{2E_a}{\pi} \cos \psi - E'_0;$$

$$a_{1m} = a_{2m} = \frac{E_a}{\pi} \left[\frac{\cos(m+1)\psi}{m+1} - \frac{\cos(m-1)\psi}{m-1} \right] \text{ при } m = 2, 4, 6, \dots;$$

$$b_{11} = -b_{21} = \frac{E_a}{2} - \frac{2E'_0}{\pi} \cos \psi;$$

$$b_{1n} = -b_{2n} = \frac{E_a}{2\pi} - \frac{2E'_0}{n\pi} \cos n\psi \text{ при } n = 3, 5, 7, \dots$$

Окончательно дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в трансформаторном агрегате электрифицированных железных дорог при однофазном режиме работы силового трансформатора Т1, будут иметь вид:

$$x_3 \frac{di_1}{d\omega t} + r_3 i_1 = \frac{a_{01}}{2} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^N a_{1m} \cos m\omega t + \sum_{n=1,3,5,\dots}^N b_{1n} \sin n\omega t;$$

$$x_3 \frac{di_2}{d\omega t} + r_3 i_2 = \frac{a_{02}}{2} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^N a_{2m} \cos m\omega t + \sum_{n=1,3,5,\dots}^N b_{2n} \sin n\omega t.$$

Выпрямленный ток силовой цепи нагрузки (электровоза) равен $i_d = i_1 - i_2$.

Ток i_1 и фазные токи вторичной обмотки силового трансформатора равны [1]:

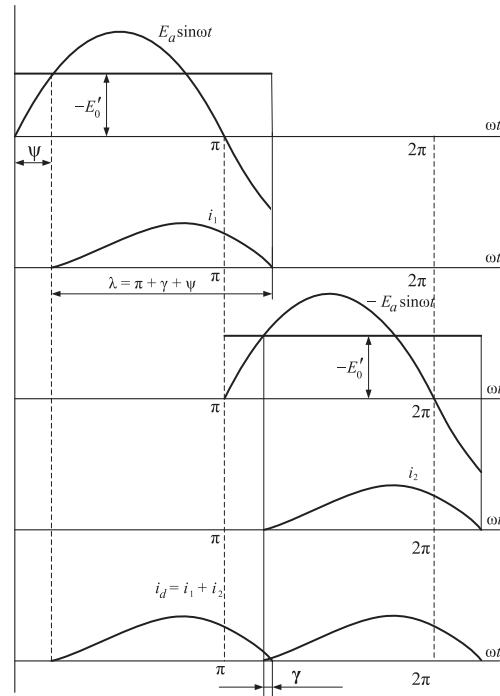


Рисунок 3 — Временные диаграммы эквивалентных ЭДС и токов

$$i = i_1 - i_2; i_a = \frac{2i}{3}; i_b = -\frac{i}{3}; i_c = -\frac{i}{3}.$$

Решение дифференциальных уравнений может быть получено непосредственно в виде тригонометрических рядов:

$$i_1 = I_{10} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^N I_{1m} \cos(m\omega t - \psi_{1m}) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^N I_{1n} \sin(n\omega t - \psi_{1n});$$

$$i_2 = I_{20} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^N I_{2m} \cos(m\omega t - \psi_{2m}) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^N I_{2n} \sin(n\omega t - \psi_{2n}),$$

$$\text{где } I_{10} = I_{20} = \frac{a_{01}}{r_3};$$

$$I_{1m} = I_{2m} = \frac{a_{1m}}{\sqrt{r_3^2 + (mx_3)^2}};$$

$$\psi_{1m} = \psi_{2m} = \arctg \frac{mx_3}{r_3} \text{ при } m = 2, 4, 6, \dots;$$

$$I_{11} = -I_{21} = \frac{b_{11}}{\sqrt{r_3^2 + x_3^2}};$$

$$I_{1n} = -I_{2n} = \frac{b_{1n}}{\sqrt{r_3^2 + (nx_3)^2}} \text{ при } n = 3, 5, 7, \dots;$$

$$\psi_{1n} = \psi_{2n} = \arctg \frac{nx_3}{r_3}.$$

Выпрямленный ток силовой цепи нагрузки (электровоза, электросекции и т. п.) равен

$$i_d = 2 \left[I_{10} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^N I_{1m} \cos(m\omega t - \psi_{1m}) \right].$$

Ток i (см. рис. 2) и фазные токи вторичных обмоток силового трансформатора Т1 рассчитываются по формулам:

$$i_1 = 2 \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11}) + \sum_{n=3,5,7,\dots}^N I_{1n} \sin(n\omega t - \psi_{1n}) \right\};$$

$$i_a = \frac{4}{3} \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11}) + \sum_{n=3,5,7,\dots}^N I_{1n} \sin(n\omega t - \psi_{1n}) \right\};$$

$$i_b = -\frac{2}{3} \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11} - 120^\circ) + \sum_{n=3,5,7,\dots}^N I_{1n} \sin[n(\omega t - 120^\circ) - \psi_{1n}] \right\};$$

$$i_c = -\frac{2}{3} \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11} - 240^\circ) + \sum_{n=3,5,7,\dots}^N I_{1n} \sin[n(\omega t - 240^\circ) - \psi_{1n}] \right\}.$$

Полученные расчетные выражения позволяют сделать следующие выводы.

1. Фазные токи силового трансформатора Т1, кроме первой гармоники, содержат также высшие нечетные гармоники, что обусловлено выпрямительным эффектом преобразователя нагрузки (электровоза).

2. Амплитуды первой и высших нечетных гармоник токов i_a, i_b, i_c зависят от величин b_{11}, b_{1m} , которые, в свою очередь, зависят от величины амплитуды фазной ЭДС вторичной обмотки силового трансформатора Т1 и от величины противо-ЭДС нагрузки (электровоз и т. п.).

3. Полученные решения дифференциальных уравнений непосредственно в виде гармонического ряда позволяют достаточно просто рассчитать:

а) коэффициент искажения, равный отношению действующего значения основной гармоники тока и полного тока первичной обмотки выпрямительного трансформатора электровоза или силового трансформатора Т1,

$$v = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}};$$

б) коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (тока), представляющий собой отношение амплитудного значения n -й гармоники составляющей выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения (тока),

$$k_n = \frac{U_{nm}}{\sqrt{U_0^2 + \sum_{n=2,4,6,\dots} U_n^2}};$$

в) коэффициент мощности силового трансформатора Т1

$$\chi = \frac{P_{a1}}{S_1} = \frac{\sum_{n=1,3,5,\dots} U_{1(n)} I_{1(n)} \cos \varphi_n}{\sqrt{U_{1(1)}^2 + U_{1(3)}^2 + \dots \sqrt{I_{1(1)}^2 + I_{1(3)}^2 + \dots}}}$$

где P_{a1} — активная мощность первичной обмотки силового трансформатора Т1, определяемая как сумма активных мощностей отдельных гармонических составляющих тока (напряжения); S_1 — полная мощность первичной обмотки силового трансформатора.

Литература

1. Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог : учебник для вузов. М. : Транспорт, 1982. 207 с.
2. Петров Г.Я. Электрические машины : учебник для вузов. М. : Госэнергоиздат, 1956. 272 с.
3. Трансформаторный агрегат с регулированием напряжения для электрифицированных железных дорог переменного тока / Б.А. Аржанников, В.Ф. Григорьев, А.А. Пышкин, Е.М. Азарова, А.В. Бондаренко; под ред. А.В. Ефимова, Ю.П. Неугодиной // Разработка и совершенствование электрооборудования для систем тягового электроснабжения : сборник науч. трудов / УрГУПС. Екатеринбург, 2009. Вып. 70 (173). 118 с.
4. Регулируемый трансформаторный агрегат электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ / Б.А. Аржанников, В.Ф. Григорьев, А.А. Пышкин, В.П. Светоносов // Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте : материалы IV междунар. симп. «Элтранс-2007», 23 — 26 октября 2007 г. СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2009. 507 с.
5. Трансформаторный агрегат с регулированием напряжения для электрифицированных железных дорог переменного тока : пат. 2321092 РФ.
6. Коганов И.Л. Электронные и ионные преобразователи : учебник для вузов. М. : Госэнергоиздат, 1956. 272 с.
7. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М. : АСТ, 2008.

References

1. Markvardt K. G. Energosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog [Power supply of electric railways]: textbook for universities. M.: Transport, 1982. 207 p.
2. Petrov G. Ya. Elektricheskie mashiny [Electric machinery]: textbook for universities. M.: Gosenergoizdat, 1956. 272 p.
3. Transformatornyy agregat s regulirovaniem napryazheniya dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka zheleznykh dorog [Transformer unit with voltage regulation for electrified AC railways] / B. A. Arzhannikov, V. F. Grigoriev, A. A. Pyshkin, E. M. Azarova, A. V. Bondarenko; Edited by A. V. Efimova, Yu. P. Neugodnikova // Razrabotka i sovershenstvovanie elektrooborudovaniya dlya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Development and improvement of electrical equipment for traction power supply systems]: Collection of scientific works / USURT. Ekaterinburg. 2009. Issue 70 (173). 118 p.
4. Reguliruemyy transformatornyy agregat elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka 25 kV [Adjustable 25 kV transformer unit of electrified AC railways] / B. A. Arzhannikov, V. F. Grigoriev, A. A. Pyshkin, V. P. Svetonovosov // Elektrifikatsiya i organizatsiya skorostnykh i tyazhelovesnykh koridorov na zheleznodorozhnom transporte [Electrification and arrangement of high-speed and heavy-load railway corridors]: Proceedings of the Fourth International Symposium "Eltrans-2007", 23-26 October 2007. Spb.: St. Petersburg State Transport University, 2009. 507 p.
5. Transformer unit with voltage regulation for AC electric railways: RF patent 2321092.
6. Koganov I. L. Elektronnyye i ionnyye preobrazovateli [Electronic and Ionic transformers]: textbook for universities. M.: Gosenergoizdat, 1956. 272 p.
7. Vygodskiy M. Ya. Spravochnik po vysshey matematike [Handbook on higher mathematics]. M.: AST, 2008.

Периодичность — 4 номера в год. Подписной индекс: 46463.

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 Пулова Елена Семеновна.
Верстка и дизайн: Курносов Антон Леонидович.

Выпускающий редактор Неверова Людмила Васильевна.

Контактный телефон: (343)370 00 53, 89068021451
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 ООО «Эзапринт»: г.Екатеринбург, ул. Ухтомская, 45.