

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
РЕМОНТНОСТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ
С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ПУТЕВЫХ МАШИН**

**СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСОК
С РЕССОРНЫМ ТРОСОМ И БЕЗ РЕССОРНОГО ТРОСА
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОГО ТОКА
НА РАБОТУ
ФИКСАТОРОВ**



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. Ledyaev 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

Конов А.А. / Государственная политика развития железнодорожного транспорта в Российской империи на рубеже XIX — XX вв.	3
Якимов М.Р. / К вопросу о влиянии градостроительных решений на изменение объемов транспортного спроса	10
Гайфуллин В.М. / Исследование взаимоотношений участников движения на улично-дорожной сети	16
Остапчук А.К., Рогов Е.Ю., Овсянников В.Е., Терещенко В.Ю., Овсянников Е.М. / Применение фрактальных моделей для описания шероховатости деталей транспортных машин	20

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

Konov A.A. / State Policy Of Railway Transport Development In The Russian Empire At The Turn Of XIX–XX cc.	3
Yakimov M.R. / On impact of town-building decisions on transport demand volume change.....	10
Gaifullin V.M. / Study Of Traffic Participants' Relationship	16
Ostapchuk A.K., Rogov E.Yu., Ovsyannikov V.E., Tereschenko V.Yu., Ovsyannikov E.M. / Using fractal models to describe roughness of transport vehicle parts	20

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Яковлев П.В. / Методика испытаний новой раздаточной коробки	25
Мацулевич М.А., Лазарев Е.А. / Влияние рециркуляции отработавших газов на топливную экономичность бензиновых двигателей	30
Савин М.А. / Исследование охлаждения дизеля ЯМЗ-236М2 после останова.....	33
Силуков Ю.Д. / Сравнение различных вариантов при проектировании автомобильной дороги	36

AUTOMOBILE TRANSPORT

Yakovlev P.V. / Testing procedure for a new transfer box	25
Matsulevitch M.A., Lazarev E.A. / Impact of exhaust gas recirculation on gasoline engine fuel efficiency	30
Savin M.A. / Studying YAMZ-236M2 diesel cooldown after stopping.....	33
Silukov Yu.D. / Comparison of different options for road design	36

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ НА Ж.Д. ТРАНСПОРТЕ

Бушуев С.В., Попов А.Н. / Обеспечение сходимости и воспроизводимости измерений сигналов тональных рельсовых цепей	38
Алексеев В.М., Алексеев В.В. / Модель информационного взаимодействия сервисов в ИТ-системе высокоскоростного транспорта	43
Костромин А.М., Крючкова Т.В. / Регрессионная модель зоны радиовидимости меток для системы бесконтактной привязки к пути подвижного состава метрополитена.....	49

AUTOMATION, REMOTE CONTROL AND COMMUNICATION IN RAILWAY TRANSPORT

Bushuev S.V., Popov A.N. / Measurement precision and repeatability control of audio frequency track circuit signals	38
Alekseyev V.M., Alekseyev V.V. / Model of service information interaction in high-speed transport IT-system	43
Kostrominov A.M., Kryuchkova T.V. / Regression model of tags radio visibility zone for the system of non-contact binding to the track of underground rolling stock	49

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Александров А.Э., Сурин А.В. / Имитационные модели и их взаимодействие в автоматизированной сквозной технологии оперативного планирования поездообразования и поездной работы.....	54
Богданович С.В., Жардем Б.Б. / Критерии оптимальности выбора схем пассажирских составов	58
Петров В.В., Кашталинский А.С. / Совершенствование организации движения в городах с учетом стохастичности транспортного потока	61

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

Aleksandrov A.E., Surin A.V. / Simulation models and their interaction in automated end-to-end technology for operational planning of train formation and train service	54
Bogdanovitch S.V., Zhardemov B.B. / Criteria for optimal selection of passenger train layouts	58
Petrov V.V., Kashtalinsky A.S. / Improving traffic management in cities with account of traffic flow stochastic behaviour.....	61

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Аккерман Г.Л., Исламов А.Р. / Исследование силовых параметров процесса движения поезда через переломы смежных элементов продольного профиля имитационным моделированием	63
Дуплякин М.К., Сизы С.В., Сай В.М. / Моделирование технологических процессов ремонтно-строительных работ с учетом надежности путевых машин	66

CONSTRUCTION AND OPERATION OF RAILWAYS

Akkerman G.L., Islamov A.R. / Studying power parameters of train movement via breaks in adjacent elements of grade by simulation modelling	63
Duplyakin M.K., Sizy S.V., Say V.M. / Modelling processes of construction and repair works with account of track machine reliability	66

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Галкин А.Г. / Сравнение динамических характеристик контактных подвесок с рессорным тросом и без рессорного троса на основе моделирования	72
Ефимов А.В., Ефимов Д.А., Дутов И.Г. / Исследование влияния тягового тока на работу фиксаторов	77
Сухогозлов А.П., Бунзя А.А. / Частичные разряды в изоляции электрического оборудования тяговых подстанций	81
Галкин А.Г., Ковалев А.А., Микава А.В. / Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токосъема	85
Чернов Ю.А. / Оптимизация развития системы тягового электроснабжения методом динамического программирования	90

ELECTRIC SUPPLY

Galkin A.G. / Comparing dynamic behaviour of overhead catenaries with or without spring rope based on modelling	72
Efimov A.V., Efimov D.A., Dutov I.G. / Studying traction current impact on lock operation	77
Sukhoguzov A.P., Bunzya A.A. / Partial discharges in insulation of traction substation electric equipment	81
Galkin A.G., Kovalev A.A., Mikava A.V. / Using lifecycle contract for infrastructure complex of current collection system	85
Chernov Yu.A. / Optimization of traction power supply system development by dynamic programming method	90

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Усов В.А., Фролов Н.О. / Анализ коммутационных перенапряжений в электрических силовых цепях электровозов	94
Буйносов А.П., Тихонов В.Ф., Пышный И.М. / Методика определения ресурса бандажей колесных пар локомотивов	98

ELECTRIC TRACTION

Usov V.A., Frolov N.O. / Analyzing switching overvoltages in locomotive power circuits	94
Buynosov A.P., Tikhonov V.A., Pyshnyi I.M. / Procedure for determining operation life of locomotive wheel set rims	98

УДК 656.2(09)

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

ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТИКА РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В РОССИЙСКОЙ ИМПЕРИИ НА РУБЕЖЕ XIX — XX вв.

Alexey A. Konov, PhD in History, Assistant Professor at Philosophy and History Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT)

State Policy Of Railway Transport Development In The Russian Empire At The Turn Of XIX–XX cc.

Аннотация

Проведен анализ государственной политики по развитию железнодорожного транспорта Российской империи на рубеже XIX — XX вв. Показаны основные направления усиления влияния государства на развитие железнодорожного транспорта при императорах Александре III и Николае II через анализ научных трудов инженеров транспорта. Раскрыты причины вытеснения государством частного капитала из железнодорожного транспорта. Выкуп частных железных дорог в казну, тарифная политика, строительство новых железнодорожных линий стали основными каналами распространения влияния государства на железнодорожном транспорте. Сделан вывод о преимуществах и издержках государственного регулирования развития железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: тариф, железнодорожная сеть, правительство, государственная политика на транспорте, транзит, транспортная стратегия, государственное регулирование.

Abstract

The article analyzes the state policy concerning railway transport development in the Russian Empire at the turn of XIX–XX cc. The main areas of state's enhanced influence on railway transport development in the time of Alexander III and Nicholas II are shown via analysis of transport engineers' transactions. Causes of private capital eviction from railway transport by the state are revealed. Buyout of private railways for the government, tariff policy, construction of new railroad lines became the main channels of extension of state influence at railway transport. The article draws a conclusion on advantages and downsides of state control of railway transport development.

Key words: Tariff, railway network, government, state policy at transport, transit, transport strategy, state control.

В сентябре 2008 г. в Москве представлен проект «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года». В разработанном документе официально признан факт наличия ограничений роста экономики, обусловленных недостаточным развитием транспортной системы. Современные объемные, экономические и качественные характеристики транспорта оказались не способными в полной мере и эффективно решать задачи растущей экономики. В разработанной программе официально заявлено о том, что российский транспорт требует «существенной перестройки», которая подразумевает активную позицию государства в реформировании транспорта и управлении им [1].

Согласно «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года», миссия государства в сфере функционирования и развития транспорта определяется как создание условий для экономического роста, повышения конкурентоспособности национальной экономики и качества жизни населения через доступ к безопасным и качественным транспортным услугам, превращение географических особенностей России в ее конкурентное преимущество. Под стратегической целью развития транспортной системы понимается удовлетворение потребностей инновационного социально ориентированного развития экономики и общества в качественных транспортных услугах, конкурентоспособных с лучшими мировыми аналогами. Таким образом, новая формулировка миссии означает активную функцию государства в области развития транспорта [1, с. 124 — 125].

Государственная политика по развитию транспортного комплекса России имеет глубокую историю, обращение к которой позволяет увидеть и понять проблемы и трудности, возникавшие на пути развития транспорта перед учеными, инженерами и государственными деятелями. В данной статье сделана попытка провести параллели, найти точки соприкосновения между предстоящими новыми реформами транспортной системы РФ и реформами в сфере транспорта на рубеже XIX — XX вв. Реформы императоров Александра III и Николая II непосредственно связаны с усилением позиций государства на транспорте, что объединяет их деятельность по развитию транспорта с мероприятиями новой стратегии развития отечественной транспортной системы.

Для царствования Александра III (1881 — 1894 гг.) характерны такие прогрессивные явления, как интенсивный экономический рост, поощрение отечественной индустрии, постепенное

превращение страны из аграрной в аграрно-индустриальную, успешная транспортная политика. Строительство Транссибирской магистрали дало тяжелой индустрии мощный импульс развития [2]. В продолжение семи лет (1890 — 1897 гг.) железнодорожная сеть России выросла более чем на половину. Ни в одной западноевропейской стране в период самого оживленного железнодорожного строительства постройка дорог не шла так энергично. «Железнодорожная горячка» 1890-х гг. была гораздо интенсивнее той, которую переживала Россия в 1860 — 1870-х гг. [3].

Исследование транспортной политики императоров Александра III и Николая II представляется крайне важным и даже злободневным на сегодняшний день. Впервые в истории страны была осуществлена попытка радикального решения вопроса о формах собственности на транспорте. Впервые были намечены основные направления модернизации материально-технической базы транспорта, которые во многом определили характер его развития в XX в. Деятельность этих императоров по развитию транспортной системы России позволяет достаточно определенно понять преимущества и издержки государственного регулирования транспортной отрасли.

К началу царствования Александра III Россия совершила огромный рывок вперед в железнодорожном строительстве: за 1850 — 1880 гг. страна увеличила свою железнодорожную сеть в 22,5 раза. Но к 1881 г. Россия существенно отставала по протяжению железнодорожной сети от Германии, Великобритании и Франции, которые увеличили свои железнодорожные сети соответственно в 5,6, 2,7 и в 8,5 раза. По сравнению с сетью США российская железнодорожная сеть была в 6,5 раза меньше. В целом протяжение железнодорожной сети Европейской России составляло к моменту воцарения Александра III 14% от общей длины всех железных дорог Западной Европы [4].

В 1860 — 1870-е гг. достаточно четко обозначились отличительные особенности строительства и эксплуатации железных дорог в Российской империи. К их числу можно отнести следующие.

1. При создании российской железнодорожной сети финансовая организация строительства вела к его удорожанию и ухудшению финансовых результатов эксплуатации.
2. В отличие от стран Западной Европы, в России все убытки экономически не оправдавших себя железных дорог ложились на государственные финансы, а не на массу акционеров, как на Западе.
3. Новые железнодорожные линии в России не могли давать таких же высоких доходов, какие были характерны для железнодорожного транспорта в основных капиталистических странах Запада. Более высокая доходность железнодорожного транспорта на Западе определялась гораздо более интенсивным использованием железных дорог по отношению к их протяженности. При огромных, даже в европейской части России, расстояниях перевозок, загрузка российских железных дорог не могла идти в сравнение с загрузкой линий в Центральной Европе. Кроме того, понижение государством железнодорожных тарифов на хлебные грузы, на перевозку угля и металлов также неизбежно сокращало доходность железных дорог.

Эти особенности не могли не наложить глубокий отпечаток на дальнейшее развитие железнодорожного транспорта в России и во многом определяли характер и принципы государственной политики по развитию транспортного комплекса в стране. Подобная транс-

портная политика государства получила название в исторической и экономической литературе «огосударствление железнодорожного транспорта». В этой политике можно выделить два больших этапа: на первом (1875 — 1890 гг.) формируются предпосылки и условия для огосударствления железнодорожного транспорта в России; на втором (1890 — 1903 гг.) политика огосударствления железнодорожного транспорта приобретает целенаправленный характер, связь железнодорожного транспорта с государственными финансами усиливается, железные дороги становятся важнейшим инструментом индустриализации страны и ускорения развития всей экономики.

Основными принципами железнодорожной политики Александра III были: разработка общих законодательных и административных мер, усиливающих позиции правительства во всех отраслях железнодорожного транспорта; выкуп частных дорог в казну; сооружение государственных железнодорожных линий и предъявление железнодорожным компаниям новых условий сооружения и эксплуатации рельсовых путей.

Первым и весьма показательным мероприятием императора стала ликвидация в сентябре 1883 г. Особого железнодорожного фонда, учрежденного в 1867 — 1868 гг. для кредитования частного железнодорожного строительства. Отныне единственным источником финансирования железнодорожного транспорта стала государственная казна. В июне 1884 г. введен государственный финансовый контроль за эксплуатацией частных железных дорог.

Законодательная неопределенность взаимоотношений железнодорожных обществ с казной и пользователями транспортных услуг порождала постоянные конфликты между ними. В то же время беспорядки в эксплуатации частных железных дорог ложились тяжелым бременем на государственную казну, вызывая напрасные со стороны казны выплаты убыточным дорогам. Интересы частных железнодорожных обществ явно не совпадали с интересами общегосударственными. В результате 12 июня 1885 г. был издан «Общий Устав Российских железных дорог». В соответствии с Уставом в 1888 — 1889 гг. на всей сети вводилось прямое бесперегрузочное сообщение. Оно резко ускорило продвижение вагонопотоков и улучшило использование подвижного состава. Устав раз и навсегда запретил руководству частных железных дорог идти на какие-либо уступки грузоотправителям в отношении действующих тарифов. Устав урегулировал ранее неопределенные отношения между железнодорожными управлениями и пассажирами, установил единообразные приемы управления железными дорогами, в целом укрепил позиции государства на транспорте [1, с. 137].

Огромную роль на железнодорожном транспорте играет система тарифов. Размеры тарифных ставок на перевозки во многом определяют эффективность работы каждого вида транспорта и оказывают непосредственное влияние на темпы экономического роста в стране. В отношении тарифной политики государства на транспорте «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» занимает достаточно взвешенную позицию. Государственная тарифная политика предусматривает сочетание механизмов свободного ценообразования с контрольными функциями государства в интересах защиты потребителей от необоснованных дискриминационных тарифов. В сфере железнодорожных перевозок предусматривается создание дифференцированной системы государственного тарифного регулирования, адаптированной к различным условиям рынка железнодорожных услуг. Согласно «Транспортной стратегии», такая тарифная политика государства на железнодорожном транспорте должна базироваться на принципе соблюдения баланса инте-

ресов между субъектами естественных монополий и пользователями их услуг. Таким образом, государство обеспечивает снижение негативного влияния тарифов на темпы экономического роста страны и устанавливает такие тарифы, которые обеспечивают эффективную работу субъектов естественных монополий [1, с. 137].

Обратимся к тарифной реформе императора Александра III.

В 1883 — 1893 гг. на железнодорожном транспорте проведена тарифная реформа. Необходимость ее была продиктована тем, что частные железные дороги, конкурируя между собой, постоянно понижали тарифы на грузовые перевозки и становились убыточными. Государство, гарантируя доходность частных дорог, вынуждено было покрывать их убытки за счет бюджета. В результате серьезно страдало народное хозяйство страны и население.

В основу тарифной реформы положена идея установления полного государственного контроля над тарифной системой железных дорог. В ноябре 1888 г. контроль над тарифами железных дорог был передан Министерству финансов, установлены единые тарифы на перевозку таких массовых грузов, как хлеб, чугун, железо, каменный уголь и соль. В основу всех установленных тарифных ставок был положен принцип постепенного снижения тарифной ставки с пуда груза при увеличении расстояния пробега груза. В 1893 г. для всей сети российских железных дорог разработан один общий тариф на перевозку грузов с большой, малой и пассажирской скоростями. Тарифная реформа заметно ускорила огосударствление железнодорожной сети. Произвольной тарификации грузов и бесконтрольному ведению счетоводства на частных железных дорогах был положен конец [5].

Тарифная политика императора Николая II имела те же основы и тенденции развития, что и политика его отца Александра III. В 1893 — 1903 гг. тарифная политика на железнодорожном транспорте стала одним из важнейших средств правительственной экономической политики. Ради усиления вывоза хлеба были значительно снижены тарифы на перевозку в экспортных направлениях, особенно на далекие расстояния, для сибирского хлеба. В интересах помещиков Центра в 1896 г. был установлен знаменитый Челябинский тарифный перелом, делавший невыгодным вывоз сибирского хлеба в Центральную Россию и оставлявший этот рынок за российскими помещиками. С этой целью было предложено продлить железнодорожную линию Челябинск — Екатеринбург — Пермь за Каму, к Северной Двине, а затем еще, во вторую очередь, от Вятки до Петербурга. Таким образом, потребителями сибирского хлеба становились северные губернии и Петербург. Морскими путями из Архангельска он направлялся также за границу. К 1898 г. ударными темпами была построена дорога Пермь — Котлас, от Котласа начинался водный путь до беломорского порта Архангельска [6].

В проведение мер для упорядочения хлебной торговли и усиления вывоза хлеба были втянуты все железные дороги — как государственные, так и частные. Они должны были строить и расширять склады для хлебных грузов, сооружать элеваторы, участвовать в строительстве портов. Железные дороги становились контрагентами Государственного банка по кредитованию хлебной торговли на местах, и в первую очередь ссуд под хлебные грузы в пути.

При Николае II не меньшее значение имело использование железнодорожных тарифов в интересах промышленной политики. Удешевление массовых перевозок минерального топлива и сырья, при отдаленности их добычи от промышленных центров, имело важное значение для металлообрабатывающей и маши-

ностроительной промышленности Северо-Западного и Центрального районов страны. Пониженные тарифы на уголь и руду были введены в интересах поощрения развития южной металлургии, а на Закавказской дороге — для усиления экспорта нефти.

Таким образом, сущность тарифной политики Александра III и Николая II принципиально не отличается от понимания этой политики авторами «Транспортной стратегии». И в том, и в другом случае государство сохраняет за собой решающую роль в тарифном деле. Тарифная политика государства на транспорте является необходимым и весьма эффективным инструментом регулирования социально-экономического развития страны.

Главным итогом первых мероприятий императора Александра III по огосударствлению железнодорожного транспорта стало создание предпосылок для выкупа убыточных железных дорог в казну. Причинами этого стали: неудовлетворительное финансовое положение большинства российских железнодорожных компаний, необходимость введения единого централизованного управления железнодорожным транспортом, необходимость сосредоточения в руках государства всей железнодорожной сети в интересах торговли и обороны. Выкуп частных дорог продолжался в течение всего царствования Александра III. Всего в эпоху Александра III было выкуплено в казну примерно 15 тыс. верст частных дорог, ликвидированы 29 железнодорожных обществ. К концу царствования императора в России существовали только 18 обществ.

Следует отметить, что выкуп частных железных дорог в казну при Александре III осуществлялся отчасти под влиянием опыта Франции и Пруссии, где выкуп убыточных дорог начался в 1878 — 1879 гг. В Англии право государственного вмешательства в дела железнодорожных обществ было установлено еще биллем 1844 г. В 1889 г. английским правительством учрежден особый постоянный комитет для рассмотрения жалоб и претензий граждан на железнодорожные общества, а право регулирования тарифов железных дорог возложено на министерство торговли. В ведение министерства торговли впоследствии были переданы вообще все железные дороги в Англии [4, с. 57 — 125].

По мнению министра финансов С.Ю. Витте, усиленный выкуп Александром III частных дорог в казну объяснялся двумя причинами. Во-первых, самодержавный государь заботился прежде всего об интересах населения страны. Во-вторых, император был шокирован появлением в его государстве особых «железнодорожных царств», в которых правили «маленькие железные короли» [7].

При Николае II усиленный выкуп частных железных дорог в казну продолжился. Однако при нем выкупались не только бесхозяйственные и убыточные железные дороги, но и прибыльные дороги по стратегическим соображениям. Кроме того, император осознавал, что при дальнейшем росте их прибыльности условия выкупа таких дорог будут становиться для казны еще более невыгодными.

Таблица 1 — Сокращение протяженности частной железнодорожной сети в связи с выкупом частных железных дорог в казну в 1892 — 1903 гг., тыс. верст [8]

Показатель	1892 г.	1896 г.	1900 г.	1903 г.
Протяженность частной железнодорожной сети, тыс. верст	17,3	12,2	7,2	17

Табл. 1 свидетельствует об активном выкупе частных железных в казну при Николае II. Фактически частная железнодорож-

ная сеть сократилась за 1892 — 1900 гг. на 10,1 тыс. верст. Вместе с тем табл. 1 хорошо показывает, что частное железнодорожное строительство даже в этих условиях продолжалось весьма активно: в 1903 г. протяженность частной железнодорожной сети вновь практически достигла уровня 1892 г. Таким образом, правительство Николая II проводило достаточно гибкую политику в отношении частного капитала на транспорте, находя в его существовании определенные положительные последствия для экономики страны. Сохранение на транспорте частных железнодорожных обществ при Николае II было продиктовано рядом соображений.

Во-первых, император понимал, что огромные масштабы строительства 1890-х гг. в организационно-хозяйственном отношении невозможны при участии исключительно правительственного аппарата в лице министерства путей сообщения и его местных органов. Совершенно необходимым становилось привлечение к новому железнодорожному строительству наиболее успешных частных железнодорожных компаний.

Во-вторых, император Николай II рассчитывал привлечь в железнодорожное строительство через частные железнодорожные компании иностранный капитал, так как прямых государственных займов оказывалось недостаточно. Финансирование железнодорожного строительства в двух формах давало возможность привлечь в эту область больше иностранных капиталов.

В-третьих, частные железные дороги в новых районах легче приспособлялись к особым условиям и требованиям этих районов. Железнодорожные общества здесь стремились повысить прибыль и поэтому были более способны к инициативе, введению инноваций в производственный процесс, которые могли быть распространены на всю сеть.

Итак, оставшиеся частные железнодорожные компании находились под контролем правительства, выполняли правительственные поручения по расширению железнодорожной сети, признавали значительное участие государства в своих прибылях. Таким образом, к концу 1890-х гг. железнодорожный транспорт России оказался под контролем государства, был создан мощный государственный сектор как за счет огосударствления прежних частных дорог, так и за счет собственного государственного строительства.

Следует отметить, что усиленный выкуп частных дорог в казну в определенной степени замедлил темпы строительства новых железных дорог и в целом привел к сильному падению частного предпринимательства в области железнодорожного строительства. В результате в эпоху Александра III было построено железных дорог всего 11 649 верст (не считая дорог Финляндии), т. е. вдвое меньше того, что было построено при Александре II. Вместе с тем строительство частных железных дорог и убытки от их эксплуатации в 1866 — 1892 гг. были в России главной причиной дефицита государственного бюджета и роста государственной задолженности.

Огромное значение в современной государственной политике по развитию транспортного комплекса отведено новому железнодорожному строительству. Развитие железнодорожного строительства служит не только освоению новых районов Севера страны, но и обеспечивает доступ к природным месторождениям, служит толчком для роста обслуживающих транспорт отраслей тяжелой промышленности, прежде всего металлургической, а также стимулом для подъема легкой промышленности.

«Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» полностью воспроизводит главную цель нового железнодорожного строительства в России, сформировавшуюся

в XIX в.: «Расширение сети железных дорог является инструментом реализации политики пространственного развития России, освоения ресурсной базы регионов и выравнивания уровня жизни населения» [1, с. 43]. К 2030 г. запланировано построить 20 730 км новых железнодорожных линий. При этом высшие приоритеты отданы реконструкции действующих и строительству технологических линий, обеспечивающих растущие потребности экономики в перевозках. Однако авторы документа внесли в данный пункт существенную оговорку о том, что приоритеты строительства военных, стратегических линий определяются государством исходя из геополитических и геоэкономических интересов страны. В результате решающее слово в новом транспортном строительстве вновь принадлежит государству.

Изучение транспортной политики Александра III позволяет утверждать, что при этом царе был совершен настоящий прорыв в строительстве стратегических военных железных дорог. При этом все новые линии такого назначения строились по его личной инициативе. В основу строительства этих дорог император заложил три принципа: железные дороги должны полностью отвечать потребностям военного ведомства; удовлетворение потребностей торговли должно играть при сооружении этих дорог второстепенную роль; военные дороги должны быть рассчитаны только на местное, а не на транзитное движение.

В течение 1883 — 1884 гг. велись усиленные работы по созданию целой сети стратегических железных дорог в Полесье и Привисленском крае. В результате энергичных усилий императора открыты для движения новые линии: Лунинец — Гомель (303 км, открыта в феврале 1886 г.), Барановичи — Белосток (209 км, открыта в ноябре 1886 г.), Брест — Холмск (114 км) и Седлец — Малкин (66 км). Все эти железнодорожные линии обеспечили связь Белоруссии и Литвы с Центром и Юго-Западом России, создали прямые выходы к портам Балтийского моря.

Присоединение к Российской империи среднеазиатского региона явилось главной причиной сооружения военной Закаспийской железной дороги Узун — Ада — Кизил-Арват — Чарджуй — Самарканд, связавшей Михайловский залив с центром Средней Азии. При сооружении этой линии была решена нигде не встречавшаяся ранее проблема преодоления больших пространств в условиях легко передвигавшихся песков в пустыне Кара-Кум. В 1884 г. Закаспийская военная дорога была доведена до Ашхабада. Затем, после занятия русскими войсками Мерва, дорога была продолжена далее через Мерв до реки Амударьи. В 1888 г. она была доведена до Самарканда [9].

В 1891 г. Александр III подписал указ о строительстве линии Владикавказ — Петровск по южному варианту — от Владикавказа по левому берегу реки Сунжи, с переходом этой реки в Грозном. Строительство дороги становилось «одним из лучших средств к окончательному умиротворению туземного чеченского населения, а также к быстрому экономическому развитию края» [5, с. 40 — 60]. Дорога пересекала главнейшие пункты сосредоточения войск в Северном Кавказе, что соответствовало видам военного министерства.

Следует отметить, что в отношении задач обеспечения военной безопасности «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» полностью повторяет основной программный тезис императора Александра III о необходимости соответствия уровня готовности транспортной системы потребностям вооруженных сил. Но в то же время авторами открыто признается отсутствие разработанного механизма привлечения приватизированных

транспортных средств для военных, мобилизационных целей: «В условиях фактически полной приватизации транспортных средств необходимо создавать условия эффективного участия компаний и организаций — владельцев транспорта в мобилизационной готовности» [1, с. 89 — 90]. Кроме того, в «Транспортной стратегии» утверждается положение о том, что привлечение транспорта к решению оборонных задач не должно приводить к уменьшению его конкурентоспособности, особенно на рынке внешнеторговых перевозок. И здесь просматривается явное расхождение документа с военной транспортной доктриной Александра III, который полностью отделял мобилизационные функции транспорта от экономических.

Одной из целей «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» обозначена интеграция России в мировое транспортное пространство и реализация транзитного потенциала страны. Для достижения этой цели разработаны программы транспортного развития четырех федеральных округов РФ — Южного, Уральского, Сибирского и Дальневосточного. Однако впервые проблема использования транзитного потенциала России была поднята еще в середине XIX в.

Александр III первым начал сооружение железных дорог в Западной и Восточной Сибири, установив тем самым надежную связь между Европой и Азией. Император понимал, что будущий экономический потенциал России, залог ее процветания — на Урале и в Сибири. В декабре 1882 г. было утверждено положение о строительстве дороги от Екатеринбурга до Тюмени «непосредственным распоряжением казны». Постройка Екатеринбургско-Тюменской дороги общей протяженностью 349,6 версты в основном закончилась к концу декабря 1885 г. Практически весь товарооборот между европейской частью России и Сибирью держался теперь на прочной, но все же тонкой нити единственной рельсовой колеи, протянувшейся от Перми до Тюмени. С открытием движения поездов в конце 1885 г. Тюмень стала крупным перевалочным центром и быстро наращивала экономическую мощь. В этот период наблюдался интенсивный подъем экономики Западно-Сибирского региона, вводились новые промышленные предприятия, велось строительство каменных зданий, открывались учебные заведения, повышалось благосостояние средних и низших слоев населения.

Период 1886 — 1901 гг. стал пиком экономического развития Тюмени. Поступавшие в Тюмень из Перми и Екатеринбурга грузы перегружались на баржи и пароходы для следования водным путем в Западную и Восточную Сибирь. Грузы из Сибири, поступавшие в Тюмень, шли поездами в промышленные районы Урала, а с открытием движения по железной дороге Екатеринбург — Верхний Уфалей — Кыштым — Челябинск в 1896 г. получили выход в центральные районы России, в Петербург и Москву. Впервые поток грузов из водных артерий Камского и Обского бассейнов, из главных промышленных зон Урала получил полноценный выход в европейскую часть России, включая Прибалтику, Польшу и Северный Кавказ [10].

В 1885 — 1892 гг. проложили вторую восточную магистраль Сызрань — Самара — Уфа — Златоуст — Челябинск протяжением 1140 км. Она пересекла Уральский хребет и вышла в Западную Сибирь, впервые соединив ее рельсовыми путями с Москвой и Петербургом.

Согласно воспоминаниям министра финансов С.Ю. Витте, лично Александру III принадлежит инициатива строительства Великого Сибирского пути. Император пришел к мысли о строительстве этой магистрали еще в 1881 — 1882 гг. Сооружение Транссибирской

магистрали было неразрывно связано с вопросом о переселении крестьянского населения в Сибирь и на Дальний Восток. Переселение снижало плотность крестьянского населения в Европейской России, оживляло «сибирскую окраину» страны.

В годы столыпинской аграрной реформы миграция крестьянского населения в Сибирь возросла еще больше. В 1906 — 1910 гг. сюда ежегодно прибывало до полумиллиона человек. Министерства земледелия и внутренних дел вели постоянную работу по отводу им земельных участков. На трассе создавались врачебно-продовольственные пункты, чтобы оказывать первоначальную помощь переселенцам. Для них ввели льготные железнодорожные тарифы, они освобождались на несколько лет от налогов и податей [9, с. 178].

Активная стратегия освоения всего дальневосточного пограничного пространства требовала строительства новой железной дороги от Благовещенска к Цицикару. 13 июня 1906 г. принято решение Совета министров о производстве изыскательских работ на трассе будущей Амурской железной дороги между Сретенском и Хабаровском. Созданный в 1909 г. Комитет по заселению и переселению Дальнего Востока под руководством П.А. Столыпина подготовил целую программу первоочередных мер, направленных на укрепление позиций России в этом регионе, которая была утверждена императором Николаем II. Программа предусматривала три стратегических направления: поощрение переселенческого движения на дальневосточную окраину, строительство Амурской железной дороги и укрепление дальневосточной военной группировки. При выборе направления Амурской железной дороги особое внимание обращалось на выяснение условий и нужд сельского хозяйства, обрабатывающей и добывающей промышленности, разработку плана развития средств сообщения в крае, а также на выработку мер борьбы с наплывом населения из соседних азиатских стран.

Строительство западного участка Амурской дороги было завершено в 1913 г., а в 1914 г. вступил в строй весь средний участок Амурской дороги. С окончанием строительства последнего восточного участка дороги от Малиновки до Хабаровска в 1915 г. открылся сквозной путь от Петрограда до Владивостока. История сооружения Амурской дороги — замечательный пример реализации государственной политики по освоению и заселению Дальнего Востока [9, с. 173 — 175].

В эпоху Александра III происходило активное расширение железнодорожной сети в Финляндии. В 1881 — 1894 гг. в этой части Российской империи были построены 1266 верст новых железных дорог (в полтора раза больше, чем при Александре II), в том числе две дороги к берегам Ботнического залива: линии Таммерфорс — Николайстадт (288 верст) и Сейняйоки — Гамла Карлебу — Улеаборг (317 верст) с ветвью Беннэс — Якобстадт (14 верст) и одна дорога к берегам Финского залива — линия Куопио — Котка (30 верст). В результате сеть финляндских железных дорог представляла собой магистраль от Петербурга до Торнео, идущую не далее 150 верст от морских берегов, с ветвями к портам Котке, Гельсингфорсу, Гаанге, Або, Бьернеборгу и к городам внутри страны — Иоэнсу, Куопио, Вильманстрандту, Каяне. Такое расположение сети было весьма целесообразным, так как все части страны сообщались между собой и с морскими портами. Таким образом, в целом во всей России, считая и Финляндию, в эпоху Александра III было построено всего 11 649 верст железных дорог, или 13 780 км.

К моменту смерти Александра III в 1894 г. протяженность железнодорожной сети общего пользования составляла 33 304 км. Из них в государственном управлении состояли 18 050 км, или более половины (52%), остальные 15 254 км содержались частными компаниями [4, с. 57 — 125]. Таким образом, численный перевес оставался на стороне казенных дорог.

Для более широкого представления о масштабах нового железнодорожного строительства при Александре III следует рассмотреть статистические данные по распределению железнодорожной сети по отдельным частям Российской империи. Табл. 2 свидетельствует о достаточно интенсивном железнодорожном строительстве при Александре III. Вместе с тем заметен явный откат назад по сравнению с предшествующей эпохой по темпам строительства новых линий в Польше, Прибалтике, Крыму и европейской части России. Снижение темпов строительства связано с выкупом частных дорог в казну и подавлением частного предпринимательства на транспорте. В то же время, табл. 2 свидетельствует о начале нового строительства в Средней Азии и Сибири — регионах, где железные дороги ранее практически отсутствовали. Из табл. 2 видно, что большая часть железнодорожной сети приходилась на европейскую часть России, включая Польшу, Прибалтику и Финляндию (82,5% всей железнодорожной сети Российской империи). Таким образом, Урал, Сибирь и Средняя Азия оставались в железнодорожном отношении неразвитыми.

Таблица 2 — Распределение железнодорожной сети по отдельным частям Российской империи к концу царствования Александра III [4, с. 57 — 125]

Регионы Российской империи	Построено железных дорог, верст		Общее протяжение дорог к концу царствования Александра III	
	до Александра III	при Александре III	верст	%
Литва	1336	1541	2877	8,2
Польша	1476	754	3230	6,4
Кавказ	971	1187	2158	6,2
Финляндия	818	1266	2084	6
Урал	666	1250	1916	5,5
Прибалтийский край	813	362	1175	3,4
Крым	231	111	342	1
Европейская Россия	15647	4776	20423	58,5
Средняя Азия	—	1290	1290	3,7
Сибирь	—	378	378	1,1
Всего, верст	21958	12915	34873	100

Обратимся к сравнительным данным, характеризующим положение России по уровню развития железнодорожной сети относительно США и стран Западной Европы (табл. 3). Данные табл. 3 свидетельствуют прежде всего об огромном, почти непреодолимом отставании России от США по протяженности железнодорожной сети: в 1880 г. протяженность железнодорожной сети России составляла 15,5% железнодорожной сети США, в 1890 г. — 12, в 1900 г. — 18%. Несмотря на то что в 1900 г. протяженность российской железнодорожной сети превысила сеть Великобритании на 37%, Германии — на 8%, Австро-Венгрии — на 33%, огромные российские пространства не шли ни в какое

сравнение с европейскими. Железнодорожная отсталость России от Европы совершенно очевидна.

Таблица 3 — Протяженность железнодорожной сети России, США и западноевропейских государств [4, с. 57 — 125]

Страна	Длина дорог, открытых для движения к концу года, км		
	1880	1890	1900
США	150717	268409	311094
Германия	33838	42869	51391
Австро-Венгрия	19512	27113	36883
Великобритания	28854	32297	35186
Российская империя	23429	32141	55709

За годы кризиса 1900 — 1903 гг. министерство финансов разместило в государственных сберегательных кассах 100 млн руб. в виде облигаций частных железных дорог. В результате железнодорожное строительство в условиях кризиса продолжалось. В 1900 г. на совещании под председательством Николая II были приняты решения: ускорить работу на строящихся линиях и начать сооружение новых; повысить снизившиеся в результате кризиса заказы на изготовление металла и подвижного состава. Поскольку дороги не имели достаточных средств на оплату заказов, их финансирование было поручено Государственному банку. Таким образом, был обеспечен высокий темп строительства, несмотря на трудности кризисного периода. Железнодорожный транспорт получал постоянную поддержку государства.

Рассмотрим основные причины отсталости России от стран Западной Европы и США по уровню развития и оснащенности железнодорожной сети.

1. В России слишком долго продолжался период недоверия и оппозиции в правительственных сферах и в обществе к железным дорогам. В общей сложности этот период продолжался 25 лет — до начала 1860-х гг. В результате первоначальное опоздание в постройке железных дорог в необходимом количестве наложило глубокий отпечаток на все дальнейшее развитие российской железнодорожной сети.
2. Железнодорожная сеть в России развивалась крайне неравномерно, что было связано с постоянными колебаниями правительства в выборе способов строительства железных дорог и систем железнодорожного хозяйства — казенного или частного.
3. Железнодорожное строительство замедлилось в результате преждевременного для страны превращения государства в контролера и руководителя частных железных дорог и преждевременного выкупа частных дорог в казну. В России слишком рано произошло падение частного железнодорожного предпринимательства. Частный капитал не реализовал полностью свой созидательный потенциал на транспорте, так как возник на 25 — 30 лет позже, чем в странах Западной Европы и США. Правительство слишком строго относилось ко всякого рода расчетам ожидаемого грузооборота и вероятных финансовых результатов работы новых дорог. На основании такого рода расчетов многим предпринимателям отказывалось в предоставлении права на постройку дорог. Политика Александра III умалывала значение и силу частной инициативы. Концессии на строительство предоставлялись одним и тем же лицам,

а новые, нередко талантливые лица к развитию сети не имели доступа.

4. Государственное строительство железных дорог неизбежно зависело от ресурсов казны, которые должны были расходоваться и на другие нужды народного хозяйства и культуры. При этом успех государственного строительства полностью зависел от общего финансового состояния государства, в результате чего при исключительно государственном строительстве происходило неизбежное замедление в постройке новых дорог. Это доказал опыт всех стран, включая Россию.

Рассмотренный в статье теоретический материал позволяет сделать ряд принципиально важных выводов о роли государства в развитии транспорта.

1. В царствование Александра III и Николая II государство становится монополистом в области развития и эксплуатации транспортной системы страны, грань между государственным и частным капиталом на транспорте постепенно исчезает.
2. Курс на казенное строительство железных дорог, начатый в 1880-е гг., сделал развитие железнодорожной сети более планомерным и учитывающим стратегические интересы государства. Основные железнодорожные линии оказались к западу от Москвы. На весь восток европейской части России и всю ее азиатскую часть приходилась малая доля железных дорог. В результате к началу Первой миро-

вой войны железнодорожный транспорт оказался слабо подготовленным к требованиям военного времени.

3. Построенные при императорах Александре III и Николае II новые железные дороги оживляли промышленность, особенно металлургическую и угольную, давали работу и хлеб десяткам тысяч оторванных от земли крестьян, пробуждали к активной экономической деятельности изолированные районы Урала, Сибири и Севера. Страна наконец ощутила практический результат невероятных, почти безнадежных усилий, в течение полувека направлявшихся на строительство железных дорог.

Этот взлет массового железнодорожного строительства при Александре III и Николае II стал возможен благодаря двум историческим обстоятельствам. Во-первых, развитие капиталистических процессов в крестьянской стране высвободило много привычных к тяжелой работе рук. Бывшие хлебопашцы, оставшиеся после отмены крепостного права без земли, согласны были работать на любых условиях. Железнодорожное строительство легко поглощало избыток рабочей силы. Во-вторых, поднимающаяся промышленность нуждалась в прогрессивном транспортном средстве и готова была платить за перевозки. В России начался железнодорожный бум, подобный тому, что Англия пережила за полвека до того.

Как и во времена Александра III, государство продолжает сегодня занимать доминирующие позиции в транспортном комплексе страны и во многом определяет основные направления его прогрессивного поступательного развития [3].

Литература

1. *Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года*. М., 2008. С. 124 — 125.
2. Боханов А.Н. Александр III. М., 2007. С. 285 — 305.
3. Конов А.А. *Транспортная политика императора Александра III и современность* // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2012. № 1 (13). С. 102 — 119.
4. Оппенгейм К.А. *Россия в дорожном отношении*. М., 1920. С. 57 — 125.
5. *Наша железнодорожная политика по документам архива Комитета Министров: исторический очерк, составленный Начальником Отделения Канцелярии Комитета Министров Н.А. Кислинским, под гл. ред. Статс-Секретаря Куломзина*. СПб.: изд. Канцелярии Комитета Министров, 1902. Т. 3. С. 40 — 60.
6. Лукьянин В.П. *Больше века на службе России*. Екатеринбург, 1998. С. 54 — 75.
7. Витте С.Ю. *Воспоминания*. М., 1960. Т. 1 — 3.
8. Витте С.Ю. *Конспект лекций о народном и государственном хозяйстве, читанных Его Императорскому Высочеству Великому Князю Михаилу Александровичу в 1900 — 1902 гг.* // Урал. 1991. № 11. С. 116 — 122.
9. *История железнодорожного транспорта России*. Т. I: 1836 — 1917 гг. СПб., 1994. С. 200 — 213.
10. Коптелов В.Т. *Железная дорога Екатеринбург — Тюмень — Омск. Очерки истории Тюменского отделения дороги*. Тюмень, 2000. С. 21 — 41.

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Transport strategy of the Russian Federation till 2030]. М., 2008. P. 124–125.
2. A.N. Bohanov. Alexander III. М., 2007. P. 285–305.
3. A.A. Konov. *Transportnaya politika imperatora Aleksandra III i sovremennost* [Transport policy of Emperor Alexander III and modernity] // Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2012. № 1 (13). P. 102–119.
4. K.A. Oppenheim. *Rossiya v dorozhnom otnoshenii* [Russia in railway relation]. М., 1920. P. 57–125.
5. N.A. Kislinisky. *Nasha zheleznodorozhnaya politika po dokumentam arkhiva Komiteta Ministrov* [Our railway policy according to documents from Minister Committee archive]: Istoricheskiy ocherk [Historical sketch] / Gl. red. [Ed.-in-chief] Stats-Sekretar Kulomzin. Spb: Kantselariya Komiteta Ministrov. 1902. T. 3. P. 40–60.
6. V.P. Lukyanin. *Bolshe veka na sluzhbe Rossii* [Over a century serving Russia]. Ekaterinburg, 1998. P. 54–75.
7. S.Yu. Witte. *Vospominaniya* [Memories]. М., 1960. Т. 1–3.
8. S.Yu. Witte. *Konspekt lektsiy o narodnom i gosudarstvennom hozyaistve, chitannykh Ego Imperatorskomu Vysochestvu Velikomy Knyazyu Mikhailu Aleksandrovichu v 1900–1902 gg.* [Summary or lectures on national and state economy read to His Imperial Highness Grand Prince Mikhail Alexandrovitch in 1900–1902]. // Ural. 1991. № 11. P. 116–122.
9. *Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii* [History of railway transport in Russia]. Т. I: 1836 — 1917 гг. Spb, 1994. P. 200–213.
10. V.T. Koptelov. *Zheleznaya doroga Ekaterinburg — Tyumen — Omsk* [Ekaterinburg — Tyumen — Omsk railway]. *Ocherki istorii Tyumenskoho ot-deleniya dorogi* [Sketches on history of Tyumen railway department]. Tyumen, 2000. P. 21–41.

УДК 656.13

Михаил Ростиславович Якимов, доктор технических наук, доцент кафедры «Экономика и управление на предприятии» Пермского научно-исследовательского политехнического университета, Пермь

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМОВ ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА

Mikhail R. Yakimov, Assistant Professor at Economics and Enterprise Management Chair, DSc in Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Russia

On Impact Of Town-Building Decisions On Transport Demand Volume Change

Аннотация

Исследуется влияние отдельных градостроительных решений на изменение транспортного спроса. Проведен анализ возможных вариантов нарушений целостности городской структуры. В общем виде представлена иллюстрация возможного изменения объема транспортного спроса при переносе мест притяжения транспортных корреспонденций из центральной части города на периферию. На транспортной модели Перми рассмотрены результаты прогнозирования функционирования транспортной системы при отдельных изменениях в городской структуре.

Ключевые слова: градостроительство, территория, транспорт, транспортный спрос.

Abstract

The article studies impact of certain town-building decisions on transport demand changes. Possible variants of urban structure integrity violations are analyzed. A general description of possible change in the transport demand volume is presented for the case when areas of transport correspondence concentration are shifted from the city centre to periphery. The results of forecasting transport system functioning in case of certain urban structure changes are considered on the transport model of Perm.

Key words: town-building, territory, transport, transport demand.

Параметры изменения транспортного спроса

Объем и структуру транспортного спроса в городах принято считать статичными параметрами, мало меняющимися по территории в связи с локальными изменениями режимов ее использования, например новое строительство объектов недвижимости или объектов транспортной инфраструктуры. Однако анализ статистики уровня автомобилизации и объемов дорожного движения наглядно показывает, что существуют довольно ярко выраженные изменения общих объемов транспортного спроса, а также способов его реализации. Можно проследить, как изменяется уровень автомобилизации в городах, растет интенсивность дорожного движения на улично-дорожной сети (УДС).

Обычно прогноз параметров транспортного спроса проводится в двух направлениях (рис. 1): прогноз подвижности населения и прогноз разделения (расщепления) всего объема транспортных корреспонденций по видам транспорта (Modal Split).

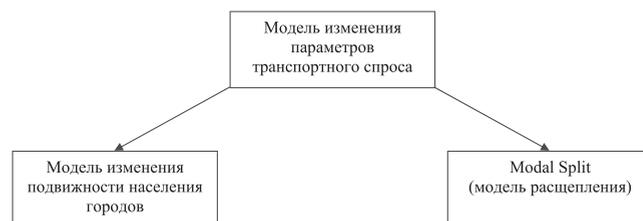


Рисунок 1 — Принципиальная схема построения прогнозных моделей объемов транспортного спроса в городах

Для расчета уровня изменения подвижности будем использовать зависимости изменения суммарного пробега, так как этот показатель учитывает в себе и изменение уровня автомобилизации, и степень (частоту) использования автомобиля (рис. 2). Рост количества автомобилей в собственности граждан опережает рост суммарного пробега всех зарегистрированных автомобилей. Это связано со следующими двумя факторами:

- во-первых, наблюдается снижение интенсивности использования личных автомобилей;

- во-вторых, наблюдается падение средней длины поездки, приходящейся на один зарегистрированный автомобиль.



Рисунок 2 — Принципиальная схема общего вклада в показатели подвижности городского населения различных характеристик транспортного спроса

Оценить падение средней длины поездки, приходящейся на один автомобиль, можно исходя из естественного стремления водителями сохранить ощущаемое время поездки в определенных рамках. Поэтому при падении скорости движения вследствие увеличения интенсивности и загрузки участков улично-дорожной сети водители сокращают общую длину каждой поездки с целью экономии своего личного времени. Соответствующие поправки, учитывающие данный факт, необходимо вносить в транспортную модель городов на этапе генерации транспортного спроса.

Однако, кроме перечисленных выше естественных, «эволюционных», факторов, влияющих на изменение структуры и параметров транспортного спроса, влияние также могут оказывать различные градостроительные решения, которые меняют непосредственно структуру города. Проведем исследование влияния таких управленческих решений по изменению городской структуры на изменение параметров транспортного спроса крупного города.

Различные управленческие решения по изменению структуры города

Существуют две базовые гипотезы трансформации городской структуры при использовании различных инструментов управления развитием транспортной системы города. Следует различать две модели потери устойчивости нормального функционирования города в результате необдуманной транспортной политики, ведущие к появлению своеобразных новообразований, которые можно назвать (рис. 3):

- «город-губка»;
- «город-бублик».

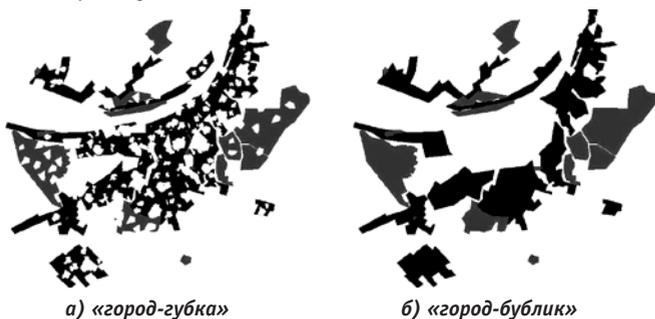


Рисунок 3 — Схемы сценарных вариантов потери устойчивости городской структуры в Перми

«Город-губка» — это такой город, где бывшие промышленные зоны, заброшенные районы и пространства не используются, не застраиваются заново, в то время как строительство все время ведется на неразработанных территориях, на свободных землях.

Формирование этого сценария потери устойчивости городской структуры уже началось во многих российских городах. Таким городам приходится постоянно резервировать территории под возрастающие потребности расширения транспортной инфраструктуры города. В результате постоянно растут затраты городского бюджета на расширение и содержание транспортной и иной инженерной инфраструктуры. «Город-губка» — это результат замкнутого цикла расплозания города вширь с одновременной необходимостью резервирования в центральной части города новых и новых площадей под развитие транспортной инфраструктуры.

«Город-бублик» — это гораздо более далекая перспектива возможного негативного развития территории и целостности города. В этой модели управления не предполагается использование жестких регламентов резервирования территорий под объекты инфраструктуры. Потеря устойчивости функционирования городской инфраструктуры по этому сценарию начнется не с экономических проблем, связанных с растущими объемами расходования бюджетных средств на содержание инфраструктуры, а с проблем самих землепользователей. Эффективность использования земли в центре таких городов будет снижаться пропорционально росту транспортных издержек на обслуживание этих территорий. После того как объемы этих издержек по доступу к территориям в центре города превысят разницу в стоимости самого земельного участка в центре и на периферии, следует ожидать массового оттока объектов приложения труда и бизнеса из центральной части города. В дальнейшем этот процесс приведет к расплозанию объектов приложения труда по периферийной территории города. При этом сама транспортная нагрузка центра города от такой передислокации объектов источников и стоков транспортных корреспонденций будет увеличиваться до тех пор, пока не нарушится экономическое единство территории как города и вместо одного «бублика» не образуются несколько самостоятельных и самодостаточных городских поселений меньшего объема.

В свете вышесказанного стоит упомянуть активно обсуждаемые в настоящее время идеи о переносе некоторых федеральных органов власти из центра Москвы за пределы города. Предполагается, что такое решение позволит значительно уменьшить нагрузку на улично-дорожную сеть в центральной части города. Однако такое решение как раз и будет являться началом сценария формирования «города-бублика», так как вслед за рабочими местами чиновников на периферию отправятся и предприятия сферы услуг, ранее обслуживавшие чиновников и работников, так как такое количество ресторанов и магазинов для жителей центральной части города окажется избыточным. Таким образом, часть мест притяжения транспортных корреспонденций сместится из центральной части города на периферию, а улично-дорожная сеть центральной части города будет использоваться для осуществления транзитных транспортных корреспонденций остальными участниками дорожного движения.

Покажем, как изменится длина совершаемых в городе транспортных корреспонденций, а следовательно, и объем транспортного спроса при таком сценарии изменения городской структуры.

Исследование изменения суммарных длин городских транспортных корреспонденций с переносом центра притяжения за пределы города

Рассмотрим в качестве примера задачу по определению суммарных длин транспортных корреспонденций при переносе мест притяжения труда из центральной части города за его пределы. Для упрощения представим форму города в виде круга. Также примем, что изначально места притяжения транспортных корреспонденций находятся в центре круга, а источники транспортных корреспонденций распределены по окружности.

Условие задачи. Дана окружность радиуса R . Центр притяжения транспортных корреспонденций изначально находится в центре окружности. В центр с границы окружности осуществляются корреспонденции из n равномерно распределенных источников. Необходимо оценить, как изменится суммарное расстояние от центра притяжения до источников движения при переносе центра притяжения в один из n источников.

Решение задачи. Рассмотрим поставленную задачу в общем виде, когда количество источников движения заранее неизвестно и составляет n источников. Так как по условиям задачи все источники транспортных корреспонденций находятся на границе окружности, то при дислокации мест приложения труда в центре города источники будут образовывать сектора с центральным углом $2\pi/n$. Схематичное представление области моделирования и начальной расстановки центра притяжения и источников притяжения изображено на рис. 4. Схематичное представление области моделирования со смещенным центром изображено на рис. 5.

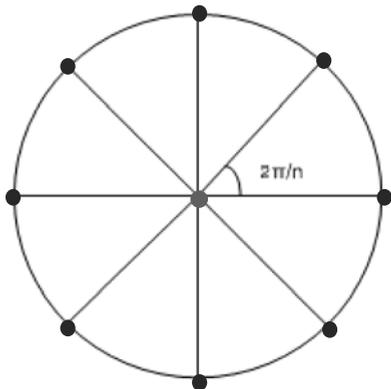


Рисунок 4 — Область моделирования с центром притяжения в центре окружности

Рассчитаем суммарную длину расстояний от изначального центра притяжения до источников корреспонденций L_0

$$L_0 = n \cdot R, \quad (1)$$

где L_0 — суммарная длина расстояний от изначального центра притяжения до источника корреспонденций, км;
 n — количество источников корреспонденций;
 R — радиус окружности (города), км.

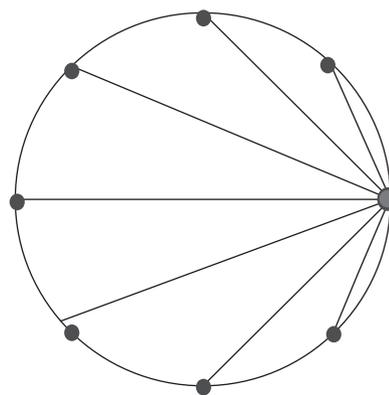


Рисунок 5 — Область моделирования с центром притяжения на окружности

Рассчитаем суммарную длину расстояний от смещенного центра притяжения до источников корреспонденций L_1

$$L_1 = \begin{cases} 4R \left(\sum_{i=1}^{n/2-1} \sin \frac{i\pi}{n} + \frac{1}{2} \right), & \text{при } n - \text{четном} \\ 4R \sum_{i=1}^{(n-1)/2} \sin \frac{i\pi}{n}, & \text{при } n - \text{нечетном} \end{cases}, \quad (2)$$

где L_1 — суммарная длина расстояний от смещенного центра притяжения до источников корреспонденций, км;
 n — количество источников корреспонденций;
 Δ — радиус окружности (города), км.

Отношение суммарной длины расстояний с центром притяжения на окружности к суммарной длине расстояний с центром притяжения в центре круга Δ

$$\Delta = \frac{L_1}{L_0}. \quad (3)$$

В зависимости от количества источников n изменяется значение Δ .

Так, при подстановке в формулу (3) выражений (1) и (2) получим

$$\Delta = \begin{cases} 4 \left(\sum_{i=1}^{n/2-1} \sin \frac{i\pi}{n} + \frac{1}{2} \right) / n, & \text{при } n - \text{четном} \\ 4 \sum_{i=1}^{(n-1)/2} \sin \frac{i\pi}{n} / n, & \text{при } n - \text{нечетном} \end{cases}. \quad (4)$$

С использованием вычислительного комплекса Wolfram Mathematica был определен коридор изменения значения параметра Δ при различных значениях n . Наименьшее значение $\Delta = 1$ получается при $n=2$, т. е. при двух источниках корреспонденций. При увеличении количества источников величина Δ растет. Так, при $n=50$ $\Delta = 1,27282$. Предельное значение Δ при $n \rightarrow \infty$ будет равно

$$\Delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{n} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2n} \right) = 1,27324.$$

Таким образом, коридор, в который попадают значения Δ , составляет

$$1 \leq \Delta \leq 1,27324.$$

В реальности количество источников корреспонденций будет стремиться к бесконечности, поэтому при переносе центра притяжения транспортных корреспонденций из центральной части города длина корреспонденций увеличится на 27,3%, следовательно, увеличится и суммарный пробег всех автомобилей в городе. Таким образом, можно сделать вывод, что перенос крупных центров притяжения транспортных корреспонденций, таких как органы власти, крупные торговые центры, на периферию не решает проблемы разгрузки улично-дорожной сети, поскольку суммарный пробег автомобилей при подобном переносе только увеличивается.

На примере Перми при помощи транспортной модели проведем численное исследование изменений объемов транспортного спроса при реализации концепции «город-бублик».

Моделирование вариантов изменения городской структуры на транспортной модели Перми

На примере Перми с помощью транспортной модели, созданной в программном комплексе PTV Vision Visum [1, 2], сделан анализ описанных выше возможных вариантов нарушений целостности городской структуры. Для этого было проведено моделирование трех сценарных вариантов изменения городской структуры.

1. Существующее положение

Рассмотрен имеющийся на сегодняшний день объем транспортного спроса на передвижения, сформированный существующим распределением мест проживания и мест приложения труда в Перми. Модель транспортного предложения сформирована на основе параметров действующей улично-дорожной сети города, структуры подвижного состава по видам транспорта.

2. Отсутствие рабочих мест в центральном планировочном районе города (ЦПР)

Данный вариант сценария имитирует развитие потери устойчивости целостности городской структуры по типу «города-бублика». Центральная часть города непривлекательна для бизнеса из-за высоких транспортных издержек, связанных с осуществлением доступа к этим рабочим местам. Все объекты притяжения транспортной активности (рабочие места, места в сфере услуг, в том числе объекты бытового обслуживания) вынесены из центральной части города, вследствие чего структура города приобретает очертания бублика, так как центр города приходит в упадок.

3. Отсутствие рабочих мест в центрально-планировочном районе и отсутствие функций сопротивления на УДС в центрально-планировочном районе

Третий вариант сценария помимо переноса объектов притяжения из центрально-планировочного района города включает в себя отсутствие функций сопротивления на улично-дорожной сети в центрально-планировочном районе, т. е. принимается гипотеза, что пропускная способность участков улично-дорожной сети в центрально-планировочном районе города бесконечна, и независимо от интенсивности движения на этих участках скорость транспортного потока равна максимальной разрешенной. Этот сценарий может иллюстрировать ситуацию, когда параллельно с оттоком из центральной части города мест приложений труда и сокращением объемов коммерческой недвижимости происходит увеличение объемов

транспортного предложения. Реконструируются и расширяются участки улично-дорожной сети, проходящие через центр города, строятся новые транспортные связи, транзитом проходящие через центр.

Интерес представляет анализ поведения транспортной системы города в целом в каждом из рассматриваемых сценариев. В частности, что будет происходить с обобщенными показателями работы городской транспортной системы в каждом из возможных сценариев, в том числе и при условии увеличения объемов дорожного строительства в центральной части города.

Для каждого сценария был проведен расчет следующих параметров.

1. Среднее время реализации транспортных корреспонденций рассчитывается по формуле

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i,j} t_{ij} \cdot x_{ij}}{\sum_{i,j} x_{ij}},$$

где

$$t_{ij} = \frac{\sum_k t_{kij} \cdot x_{kij}}{\sum_k x_{kij}};$$

$$x_{ij} = \sum_k x_{kij},$$

x_{ij} — матрица корреспонденций;

t_{ij} — матрица затрат, рассчитывается как средневзвешенное от нагрузок путей;

x_{kij} — нагрузка пути номер k из района i в район j ;

t_{kij} — время пути номер k из района i в район j в нагруженной сети.

Среднее время реализации транспортных корреспонденций выражает среднее время, затрачиваемое одним человеком на совершение одной транспортной корреспонденции.

2. Транспортная зависимость территории — это определяемый расчетным путем показатель, связывающий пространственные характеристики отдельных городских территорий с общим объемом транспортного спроса в городе, имеющий размерность чел-км в сутки [3, 4]. Это объем перемещения пассажиров (грузов) по данной территории (чел-км) в течение дня при идеальном удовлетворении существующего транспортного спроса. Практический смысл транспортной зависимости территории заключается в том, что найденная величина для каждого конкретного участка территории города будет определять целесообразность и виды возможных административных (управленческих) ограничений на доступ к участкам улично-дорожной сети внутри данной территории. Чем больше величина G_{rs} , тем сильнее транспортная нагрузка в рассматриваемой области, и наоборот.

Значение транспортной зависимости территории определяется как

$$G_{rs} = \sum k_{ij} \cdot I_{ij},$$

где G_{rs} — транспортная зависимость области r по типу прохождения s , чел-км в сутки;

k_{ij} — значение элемента матрицы (объем) корреспонденций между i -м и j -м транспортными районами, чел;

l_{ij} — доля длины корреспонденции между i -м и j -м транспортными районами, попадающая в исследуемую область r по типу прохождения s (рис. 6), км.

Кроме обобщенных показателей качества функционирования транспортной системы города, интерес представляет также отдельная территория — центр города. При рассмотрении отдельных районов целесообразно рассмотреть, как изменяются объемы транспортной нагрузки на исследуемые территории по видам их прохождения через область.

Рассматривались 3 типа прохождения области (см. рис. 6):

AB — транзитное движение через область;

BC — въезд в область;

CD — движение внутри области.

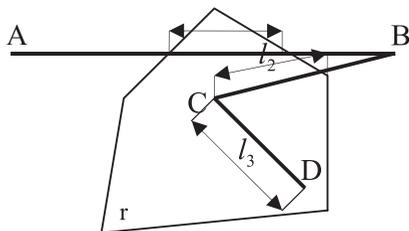


Рисунок 6 — Исследуемая область. Типы прохождения корреспонденций (маршруты корреспонденций)

Анализ проводился для двух областей (городских территорий):

- центрально-планировочного района (центра города);
- всего города в целом.

Контуры центрально-планировочного района представлены на рис. 7.

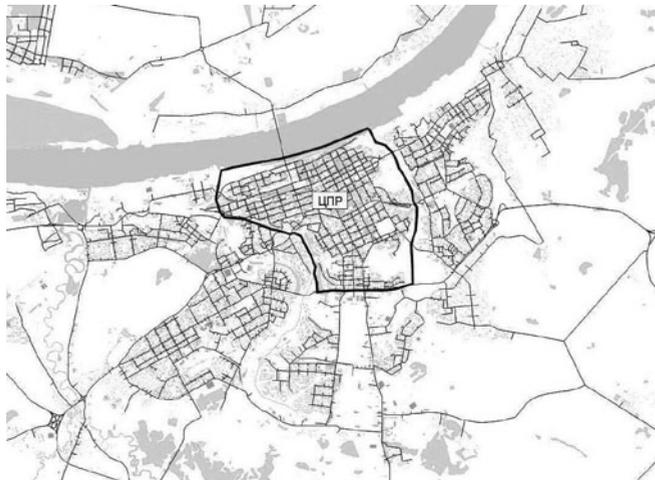


Рисунок 7 — Контуры центрально-планировочного района на карте Перми

В результате расчетов были получены следующие значения параметров (табл. 1).

Полученные значения среднего времени реализации транспортных корреспонденций (увеличение во втором и третьем сценариях) говорят о существенном ухудшении транспортной ситуации по городу в целом. Данную тенденцию можно объяснить тем, что увеличилась средняя длина пути, так как

Таблица 1 — Среднее время реализации транспортных корреспонденций

Сценарий	Изменение среднего времени реализации транспортных корреспонденций относительно существующего положения, %
Без рабочих мест в ЦПР	+5,723
Без рабочих мест и сопротивления на УДС в ЦПР	+4,524

жители центральной части города стали совершать трудовые и бытовые корреспонденции за пределами центра. Аналогично жители периферийных районов, которые ранее работали или получали бытовое обслуживание в центральной части города, вынуждены совершать корреспонденции в другой периферийный район, вследствие чего их средний пробег тоже увеличился. Также гипотезу об увеличении среднего пробега подтверждает то, что в третьем сценарии среднее время лучше, чем во втором, но хуже, чем в первом. Это объясняется тем, что в третьем сценарии мы отбросили фактор снижения скорости движения в ЦПР вследствие возросшей транспортной нагрузки.

Рассмотрим результаты расчета транспортной зависимости территории по видам корреспонденций для каждого сценария (табл. 2).

Таблица 2 — Транспортная зависимость для рассчитываемых сценариев

Транспортная зависимость по каждому из сценариев, чел-км в сутки			
	Существующее положение	Без рабочих мест в ЦПР	Без рабочих мест и сопротивления
ЦПР			
AB	106363	184418	224911
BC	248369	83248	88004
CD	87936	6452	6226
Город в целом			
Все виды	5092440	6245686	6311372

Подробнее проведем анализ изменения транспортной зависимости для каждой из областей:

1. Центрально-планировочный район

Для второго и третьего рассмотренных сценариев увеличивается транзит через центрально-планировочный район, при этом в 3 раза уменьшается доля въезда и почти в 15 раз — внутренние корреспонденции. Важным представляется именно результат увеличения доли транзитных корреспонденций через центр города. Перераспределение дислокации мест приложения труда по территории города само по себе вызывает негативные последствия, в том числе и для самого центра города. Важным представляется тот факт, что нагрузка на центр города в виде транзитных корреспонденций увеличивается даже в случае фиксированного объема транспортно-предложения в центральной части. Это свидетельствует о том, что концентрацию мест приложения труда в центральных частях города нельзя назвать в качестве основной причины роста транспортных издержек в транспортной системе. Одно-

временно можно отметить, что дополнительное дорожное строительство в центре города будет востребовано, однако это само по себе не приведет к снижению транспортных издержек и сокращению времени реализации транспортных корреспонденций. Это необходимо учитывать при принятии решений о реконструкции и расширению элементов улично-дорожной сети в центральных частях городов.

2. Город в целом

Транспортная зависимость в целом для города увеличилась на 23%. Это в первую очередь говорит о том, что увеличилась нагрузка на городскую транспортную систему. Следует также отметить, что и в дальнейшем, при увеличении транспортного предложения посредством реконструкции и строительства новых элементов улично-дорожной сети, этот рост будет продолжаться.

Проведенный анализ показал, что сформированный в настоящий момент во многих крупных городах каркас периферийного расселения и концентрации мест приложений труда

в центральных частях является скорее благом для функционирования транспортной системы, нежели злом, как это часто принято считать. Рост доли третичного сектора экономики в общем объеме мест приложения труда определяет новую структуру распределения производительных сил по территории городов. Места приложения труда в сфере услуг направлены на создание продукта, равно востребованного у всего населения города. Дальнейшая сегментация рынка услуг, выделение из него новых видов услуг приводит к естественному процессу концентрации мест их предоставления в центре города. Это экономически оправданная, естественная необходимость охвата максимального рынка потребителей.

Нарушение этого сложившегося баланса приведет лишь к возрастанию нагрузки на городские транспортные системы, росту транспортных издержек городского сообщества, увеличению бюджетной нагрузки на развитие и последующее содержание элементов городской транспортной инфраструктуры.

Литература

1. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. *Modeling Transport*. John Wiley & Sons Ltd, 2001. 594 с.
2. Якимов М.Р. Общий алгоритм работы четырехшаговой транспортной модели // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 1 (48). С. 113 — 119.
3. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Методика оценки эффективности реализации транспортного спроса на урбанизированной территории // Транспорт Урала. 2010. № 3. С. 34 — 39.
4. Якимов М.Р. Методы формализации пространственного распределения структурных элементов городской среды при моделировании транспортного спроса // Транспорт Урала. 2011. № 2 (29). С. 20 — 24.

References

1. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. *Modeling Transport*. John Wiley & Sons Ltd, 2001. – 594 p.
2. M.R. Yakimov. *Obschiy algoritm raboty chetyrehshagovoy transportnoy modeli [General operation algorithm of four-step transport model]* // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. № 1 (48). P. 113 – 119.
3. Yu.V. Trofimenko, M.R. Yakimov. *Metodika otsenki effektivnosti realizatsii transportnogo sprosa na urbanizirovannoy territorii [Procedure for assessing efficiency of transport demand realization on urbanized land]* // *Transport Urala*. Ekaterinburg. 2010. № 3. P. 34 – 39.
4. M.R. Yakimov. *Metody formalizatsii prostranstvennogo raspredeleniya strukturnykh elementov gorodskoy sredy pri modelirovanii transportnogo sprosa [Methods for formalization of spatial distribution of urban environment structural elements during transport demand modelling]* // *M.R. Yakimov // Transport Urala*. 2011. № 2 (29). P. 20 – 24.

УДК 656.13

Владислав Махмустьянович Гайфуллин, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Южно-Уральского государственного университета, (ЮУрГУ), Челябинск

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОТНОШЕНИЙ УЧАСТНИКОВ ДВИЖЕНИЯ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

Vladislav M. Gaifullin, Senior Lecturer at Automotive Transport Operation Chair of the AT faculty of South Ural State University

Study Of Traffic Participants' Relationship

Аннотация

Рассмотрена проблема взаимоотношений водителей и пешеходов на примере их взаимодействия на улично-дорожной сети в условиях стесненного движения. Показаны связи компонентов комплекса ВАДС в дорожном движении, а также возможности безопасного движения автомобиля при различной ширине проезжей части. Обращается внимание на отдельные противоречия в пунктах Правил дорожного движения РФ, касающиеся пешеходов.

Ключевые слова: взаимоотношения водителей и пешеходов; ширина полосы движения; безопасный интервал; нерегулируемый пешеходный переход; поведение пешеходов.

Abstract

The article deals with the issue of relationship between drivers and pedestrians by the example of their interaction on the street and road network in congested traffic conditions. The relationship of the components of the driver-car-road-environment complex in road traffic are considered, as well as possibilities of safe driving at different widths of carriageway. Attention is paid to certain contradictions in paragraphs of the RF Traffic Rules related to pedestrians.

Key words: relationship between drivers and pedestrians; width of carriageway; safe interval; uncontrolled pedestrian crossing; pedestrians' behaviour.

Взаимоотношения водителей и пешеходов на проезжей части определяются действующими Правилами дорожного движения. Несмотря на постоянные уточнения и поправки, эти Правила все равно остаются несовершенными и противоречивыми.

Рассмотрим некоторые требования Правил, регламентирующие взаимоотношения водителей и пешеходов.

В п. 4.1 сказано, что при отсутствии тротуаров, пешеходных дорожек или обочин, а также в случае невозможности двигаться по ним, пешеходы могут двигаться по велосипедной дорожке или идти в один ряд по краю проезжей части (на дорогах с разделительной полосой — по внешнему краю проезжей части). При движении по краю проезжей части пешеходы должны идти навстречу движению транспортных средств [1].

В большинстве стран мира велосипед как транспортное средство не потерял своего значения. Для движения велосипедистов выделяют место на проезжей части или отдельные полосы с разметкой и дорожными знаками с символами велосипедистов. В Челябинской области, как и во всей России, все иначе. Во-первых, даже в областном центре нет ни одной велосипедной дорожки. Только в районе п. Синеглазово по южному направлению есть один километр велосипедной дорожки, но она давно заброшена, заросла, и движение по ней невозможно

Во-вторых, для движения пешеходов в один ряд требуется 0,75 — 1 м ширины пешеходного пути, в данном случае — проезжей части. Принимая во внимание обычное качество края проезжей части, ширина пешеходного пути в 1 м не является завышенной. В результате можно утверждать, что п. 4.1 Правил фактически сужает полосу движения транспортных средств на 1 м, отдавая этот 1 м пешеходам, однако пешеходы считают, что движение по обочине для них невозможно. В самом деле, возможно ли движение по обочинам, если на них зимой снег, а в остальное время года — грязь, ямы, лужи воды?..

Отсутствие тротуаров или пешеходных дорожек приводит к серьезным дорожно-транспортным происшествиям. Так, несколько лет назад отсутствие пешеходной дорожки у садоводческого кооператива привело к трагическим последствиям. Водитель автомобиля ВАЗ-2106 совершил наезд на группу пешеходов, шедших по полосе движения транспортных средств по ходу движения. В результате ДТП четыре человека погибло.

Еще один пример — дорога от плотины Шершневого водохранилища до садов, протяженность которой составляет 3 км. Эта дорога при интенсивности движения более 14 тыс. ед. должна соответствовать первой категории на всем ее протяжении. На практике же ширина дороги составляет всего 6 м, да и эта ширина небезопасна для движения [2]. В настоящее время начата реконструкция этой дороги и предусмотрены пешеходные дорожки. Дорогу расширяют под вторую категорию. Однако трудно предугадать, что в будущем на ней будут заторы и ДТП.

Интересен вопрос: должны ли пешеходы уступать дорогу приближающемуся транспорту при движении вдоль проезжей части или же транспорт должен уступать дорогу пешеходам?

Пешеход не имеет возможности уступать дорогу транспортному средству по двум причинам: в связи с отсутствием обочины или невозможностью движения по ней. Но при этом водители транспортных средств должны вести транспортное средство ближе к правому краю «проезжей части», т. е. как раз там, где могут находиться пешеходы.

Что должен сделать в этом случае пешеход, действия которого не регламентированы Правилами дорожного движения? По большому счету, невозможность движения по обочине еще не означает «невозможность» пешехода находиться на ней. Иными словами, для сохранения своей жизни и здоровья пешеходу необходимо сойти с проезжей части, пропустить движущееся транспортное средство, а затем снова продолжить движение по краю проезжей части.

Рассмотрим вариант, при котором пешеход не покидает проезжую часть. Ширина полосы движения, предназначенная для движения автомобилей в один ряд, разделяется обычно продольной разметкой, которая определяет требования к траектории движения автомобиля. Чем уже ширина полосы, тем больше психическое напряжение у водителя, обеспечивающего точное положение автомобиля на дороге.

Усложняют движение неровности проезжей части, погодные условия и т. д. При малой ширине полосы при встречном разъезде на узкой дороге водитель под воздействием зрительного восприятия вынужден снижать скорость, так как усложняются условия движения¹.

На основании исследований на дорогах профессором Д.П. Великановым получена зависимость, характеризующая приближенно связь между скоростью и необходимой шириной полосы дороги [2]

$$B_n = 0,015 \cdot V_a + b_a + 0,3, \quad (1)$$

где B_n — минимальная ширина полосы движения, м;

V_a — расчетная скорость движения транспортного средства, км/ч;

b_a — ширина транспортного средства, м;

0,3 — зазор безопасности, м;

¹ Наиболее опасна ситуация в темное время суток. Многие пешеходы не владеют информацией о состоянии аварийности с их участием и не хотят иметь при себе предметы со световозвращающими элементами, которые обеспечивают видимость этих предметов водителям транспортных средств, как это рекомендуют Правила (п. 4.1) и закреплено постановлением Правительства РФ от 14 декабря 2005 г. № 767. Это актуально для поселков, окраин всех крупных городов, где отсутствует освещение или оно недостаточно, где нет тротуаров и пешеходных дорожек. Особенно опасно, если аксессуаров со световозвращающими элементами нет у детей.

По аналогии с понятием «динамический габарит» автомобиля показатель B_n можно назвать «динамической шириной» транспортного средства («динамическим коридором»), так как для уверенного движения со скоростью V_a водитель должен располагать примерно таким свободным «коридором» движения. В этой зависимости можно еще раз проследить связи компонентов комплекса ВАДС в дорожном движении. В формуле (1) B_n представляет собой элемент дороги (Д), b_a — характеристику автомобиля (элемент А), коэффициент 0,015 отражает психофизиологические свойства водителя и ходовые свойства автомобиля (подсистему).

Согласно приведенной зависимости, скорость, с которой водитель средней квалификации длительно и уверенно может управлять легковым автомобилем при ширине полосы 3 м, ориентировочно составляет около 60 км/ч, а при ширине полосы 35 м — около 90 км/ч. При управлении грузовым автомобилем с габаритной шириной 2,5 м и ширине полосы 3,5 м — около 50 км/ч.

Расчетные скорости движения транспортных средств для различных модификаций транспортных средств по полосе, уменьшенной из-за движения пешеходов на 1 м

Скорость движения по полосе, уменьшенной до 2 м

$$V_a = \frac{B_n - b_a - 0,3}{0,015}$$

Для легковых автомобилей

$$V = \frac{2 - 1,7 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 0.$$

Для малотоннажных грузовиков

$$V = \frac{2 - 2,1 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 0.$$

Для большегрузных автомобилей и автобусов

$$V = \frac{2 - 2,5 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 0.$$

Ширина полосы 2,5 м

Для легковых автомобилей

$$V = \frac{2,5 - 1,7 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 33 \text{ км/ч.}$$

Для малотоннажных автомобилей

$$V = \frac{2,5 - 2,1 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 7 \text{ км/ч.}$$

Для большегрузных автомобилей и автобусов

$$V = \frac{2,5 - 2,5 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 0.$$

Ширина полосы 2,75 м

Для легковых автомобилей:

$$V = \frac{2,75 - 1,7 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 47 \text{ км/ч.}$$

Для малотоннажных автомобилей

$$V = \frac{2,75 - 2,1 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 20 \text{ км/ч.}$$

Для большегрузных автомобилей и автобусов

$$V = \frac{2,75 - 2,5 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 7 \text{ км/ч.}$$

Ширина полосы до 3 м для различных модификаций автомобилей

Для легковых автомобилей

$$V = \frac{3 - 1,7 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 67 \text{ км/ч.}$$

Для малотоннажных автомобилей

$$V = \frac{3 - 2,1 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 40 \text{ км/ч.}$$

Для большегрузных автомобилей и автобусов

$$V = \frac{3 - 2,5 - 0,3}{0,015};$$

$$V = 13 \text{ км/ч.}$$

В табл. 1 сведены расчетные значения скорости движения автомобилей, подсчитанные по приведенной формуле в случае, если исходная ширина полосы движения будет уменьшена на 1 м, которая может быть использована в соответствии с п. 4.1 Правил дорожного движения.

Таблица 1 — Расчетные значения скорости движения автомобилей

Ширина полосы движения B_n , м	Тип транспортного средства, ширина b_n		
	Легковые, 1,7	Малотоннажные грузовики, 2,1	Грузовики, автобусы, 2,5
2,0	0	0	0
2,5	33	7	0
2,75	47	20	7
3,0	67	40	13

Таким образом, водители автомобилей различной модификации могут безопасно вести автомобиль при ширине проезжей части 3 м и более. Движение средних и больших грузовых автомобилей, а также автобусов невозможно при ширине полосы движения менее 2,5 м. При ширине полосы движения 2 м движение любых автомобилей практически невозможно.

Ясно, что п. 4.1 Правил несовершенно и пешеходное движение по краю проезжей части в один ряд невозможно: либо движение пешеходов будет затруднено, если приоритет будет отдан транспорту, либо будет затруднено движение транспорта,

если приоритет будет отдан пешеходам. Поскольку приоритет никому не отдан, а движение, независимо от Правил, существует, то в случае ДТП последствия могут быть самые тяжелые [1].

Безопасности пешеходов грозит и встречный разъезд транспортных средств. Движущиеся навстречу транспортные средства не оставляют безопасной полосы для движения пешеходов в случае отсутствия тротуара или пешеходной дорожки. Посмотрим, что остается пешеходам при встречном движении легковых автомобилей. Для определения безопасного интервала при встречном разъезде транспортных средств предлагается формула профессора Д.П. Великанова [3]

$$U = 0,3 + 0,005 \cdot (V_1 + V_2). \quad (2)$$

Для города скорость определена и составляет 60 км/ч. Тогда безопасный интервал в городских условиях, согласно формуле (2), будет равен

$$U = 0,3 + 0,005 \cdot (60 + 60);$$

$$U = 0,9.$$

Если учесть, что для безопасного вождения легковых транспортных средств (см. табл. 1) необходима ширина полосы движения, равная 3 м, а для грузовых автомобилей и автобусов — 3,5 м, понятно, что при отсутствии тротуаров или пешеходных дорожек двигаться пешеходу по краю проезжей части невозможно.

Пункт 4.6 гласит: «Выйдя на проезжую часть, пешеходы не должны задерживаться или останавливаться, если это не связано с обеспечением безопасности движения». А что означает «не связано с обеспечением безопасности движения»? Пешеход, выходя на проезжую часть, неизбежно подвергает свою жизнь опасности. Многие зависит от технического состояния транспортных средств, психического, морального и физического состояния водителя. А если у автомобиля отказала тормозная система или водитель решил проехать перед близко идущим пешеходом?

И далее: «Пешеходы, не успевшие закончить переход, должны остановиться на линии, разделяющей транспортные потоки противоположных направлений».

А что делать пешеходу, если нет островка безопасности или линии, разделяющей потоки? При отсутствии посекундного отсчета на светофоре сразу загорается красный сигнал. В Правилах не предусмотрен интервал для перехода пешеходов.

В п. 14.1 Правил говорится: «Водитель транспортного средства обязан уступать дорогу пешеходам, переходящим проезжую часть по нерегулируемому пешеходному переходу». В поправке к Правилам, вступившим в силу с 20 ноября 2010 г., сказано, что должны быть исключены все двойные толкования того, как именно водитель должен уступать дорогу пешеходу. В п. 14.1 теперь четко прописано, что водитель транспортного средства, приближающегося к нерегулируемому пешеходному переходу, обязан снизить скорость или остановиться перед переходом, чтобы пропустить пешеходов, переходящих проезжую часть или вступивших на нее для осуществления перехода. Что значит пропустить пешехода? Ждать, когда пешеход полностью пройдет проезжую часть, или достаточно того, что он отойдет на безопасное расстояние от автомобиля? Переходящий проезжую часть пешеход приравнивается к пешеходу, вступившему на проезжую часть.

«Пешеход считается переходящим, если он хотя бы одной ногой вступил на проезжую часть», — трактует правила заместитель министра Департамента МВД России, отвечающий за транспортную безопасность, генерал-полковник милиции В.Н. Кирьянов.

Однако в толковом словаре русского языка С.И. Ожегова и Н.Ю. Шведовой термины «уступить» и «пропустить» имеют практически одинаковое значение. Уступить — уступить дорогу (посторониться), пропустить — дать дорогу, разрешить пройти, проехать [4].

Еще раз вспомним про пешеходные переходы. На регулируемом пешеходном переходе загорается зеленый сигнал светофора для пешеходов, а на пешеходном переходе стоит троллейбус или маршрутное такси. Пешеход вынужден обходить эти транспортные средства и тем самым нарушать Правила дорожного движения. В последнее время подобные ситуации наблюдаются на многих пешеходных переходах города.

Исходя из вышесказанного видно, что взаимоотношения водителей и пешеходов сложны и противоречивы. Обострение проблемы в последнее время вызвано еще и значительным увеличением числа транспортных средств. Условия дорожного движения для пешеходов при этом значительно изменились, став более сложными и опасными.

В новых условиях движения от пешеходов потребовались и новые более безопасные стандарты поведения на дорогах. Однако указанные изменения произошли за сравнительно короткий промежуток времени, и у населения не успели естественным образом сформироваться стандарты поведения, соответствующие новым условиям дорожного движения. Деятельности по формированию новых стандартов со стороны государства и контроль над соблюдением Правил дорожного движения пешеходами оказалось явно недостаточно. В результате наблюдается резкий рост количества ДТП, погибших и раненых в них из-за нарушений пешеходами Правил дорожного движения.

Отсутствует необходимая дорожная инфраструктура, отвечающая новым дорожным условиям движения для пешеходов,

надежно защищающая их от наездов транспортных средств. Отсюда недостаточное количество подземных, надземных и регулируемых пешеходных переходов, островков безопасности, тротуаров, поднятых над уровнем проезжей части дороги, дорожных ограждений и т. д.

На федеральном и региональном уровне нет соответствующих организационных структур, ответственных за обеспечение безопасности пешеходов, что приводит к ослаблению контроля за соблюдением Правил дорожного движения, нарушении которых с увеличением интенсивности и плотности движения все чаще приводит к ДТП.

В настоящее время в структуре управления дорожно-транспортным хозяйством городов (кроме Москвы и Санкт-Петербурга) отсутствуют подразделения, осуществляющие функции управления в этой сфере. В большинстве городов не проработаны механизмы оценки существующего состояния дорожно-транспортных условий на основе регулярного сбора анализа информации о транспортных и пешеходных потоках и статистики ДТП, что исключает принятие оптимальных и экономически обоснованных решений в сфере организации дорожного движения. Отсутствует база данных о количестве и качественных характеристиках пешеходных переходов. Внедряемые мероприятия, как правило, локальны, не объединены в единый комплекс по усовершенствованию условий движения на участке улично-дорожной сети, не увязаны с генеральной схемой развития города, отсутствует целевое выделение материально-технических ресурсов для этих целей.

Исходя из высокого уровня и значительных масштабов неблагоприятной динамики показателей дорожно-транспортного травматизма пешеходов можно сделать вывод о том, что, если не предпринимать специальных усилий, направленных на решение этой проблемы, ситуация будет еще более обостряться. Поэтому повышение безопасности движения пешеходов должно стать приоритетным направлением деятельности по обеспечению безопасности дорожного движения в России на ближайшие несколько лет.

Литература

1. Правила дорожного движения Российской Федерации. М.: Транспорт, 2011. 62 с.
2. Кликовштейн Г.И., Афанасьев М.Б. Организация дорожного движения : учеб. для вузов. М.: Транспорт, 2001. 247 с.
3. Великанов Д.П. Эффективность автомобильных транспортных средств и транспортной энергетики. М.: Наука, 1989. 163 с.
4. Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка: 80000 слов и фразеологических выражений. М., 1997. 944 с.

References

1. *Pravila dorozhnogo dvizheniya Rossiyskoy Federatsii [Russian Federation Traffic Rules]*. M.: Transport, 2011. 62 p.
2. G.I. Klinkovshtein, M.B. Afanasyev. *Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya [Traffic management]: Ucheb. dlya vuzov [Study Guide for Universities]*. M.: Transport, 2001. 247 p.
3. D.P. Velikanov. *Effektivnost avtomobilnykh transportnykh sredstv i transportnoy energetiki [Efficiency of automotive vehicles and transport power engineering]*. M.: Nauka, 1989. 163 p.
4. S.I. Ozhegov, N.Yu. Shvedova. *Tolkovy slovar russkogo yazyka [Explanatory Dictionary of the Russian Language] 80000 slov i frazeologicheskikh vyrazheniy. 4-e izd., M., 1997. 944 p.*

УДК 621.19

Александр Константинович Остапчук, кандидат технических наук, заведующий кафедрой общепрофессиональных дисциплин Курганского института железнодорожного транспорта (КИЖТ),
 Евгений Юрьевич Рогов, заведующий лабораторией Курганского института железнодорожного транспорта (КИЖТ),
 Виктор Евгеньевич Овсянников, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Инноватика и менеджмент качества» Курганского государственного университета (КГУ),
 Владимир Юрьевич Терещенко, главный технолог ОАО «НПО «Курганприбор», Курган
 Евгений Михайлович Овсянников, эксперт 3-й категории ООО «Ремэк», Курган

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Alexander K. Ostapchuk, PhD in Engineering, Head of Common Professional Subjects Chair of Kurgan Institute of Railway Transport,
 Evgeniy Yu. Rogov, Head of Laboratory at Kurgan Institute of Railway Transport,
 Viktor E. Ovsyannikov, PhD in Engineering, Senior Lecturer at Innovations and Quality Management Chair of Kurgan Institute of Railway Transport
 Vladimir Yu. Tereschenko, Chief Technologist at Open Joint-Stock Company "Scientific Production Association Kurganpribor" OJSC SPA Kurganpribor
 Evgeniy M. Ovsyannikov, Category 3 Expert at LLC Remeks, Kurgan

Using Fractal Models To Describe Roughness Of Transport Vehicle Parts

Аннотация

Рассмотрены вопросы применения методов фрактальной геометрии для моделирования шероховатости поверхностей. Приведены результаты моделирования фрактальных шероховатых поверхностей на основе наиболее распространенных на сегодняшний день методов: моделирования при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта, Фурье-фильтрации и метода случайных сложений. В качестве исходных данных используются значения, взятые с профилограмм реальных поверхностей. Показано, что все методы классической фрактальной геометрии непригодны для моделирования шероховатости реальных поверхностей, так как дают большую погрешность (более 70%). На основании результатов анализа алгоритмов всех трех методов выявлены их достоинства и недостатки.

Проведенные исследования показали, что наиболее пригоден для моделирования метод случайных сложений, однако он нуждается в модернизации. Изложена сущность модернизированного авторами метода, установлено, что погрешность моделирования при его использовании не превышает 10% и является достаточной для технических расчетов.

Ключевые слова: шероховатость, алгоритм, метод, моделирование, погрешность, фрактальная геометрия.

Abstract

The article considers issues of using fractal geometry methods to model surface roughness. Results of modelling fractal rough surfaces using the most widespread up-to-date methods are given: modelling through the Weierstrass-Mandelbrojt function, Fourier filtration and random addition method. Input data are the values taken from profile charts of real surfaces. It is shown that all methods of classical fractal geometry are unsuitable for modelling the roughness of real surfaces since they have a large error (over 70%). Based on comparing the results of method algorithm analysis, the advantages and shortcomings of the three methods are shown.

The studies showed that the most suitable modelling method is the random addition method, however, it needs improvement. The essence of the improved method is given and it is shown that modelling error at its use does not exceed 10% and is sufficient for engineering design.

Key words: roughness, algorithm, method, modelling, error, fractal geometry

Для решения многих практических задач при проектировании узлов транспортных машин: определения действительных параметров контактного взаимодействия сопряженных деталей машин (например, шестерен), расчета узлов гидро- и пневмосистем на герметичность и т. д. — необходимо иметь точные модели шероховатости поверхности. Одними из наиболее перспективных являются методы фрактальной геометрии.

В настоящее время разработан ряд методов моделирования фрактальных шероховатых объектов, основные из них —

фильтрация Фурье, моделирование при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта и метод случайных сложений [1]. Для построения наилучшей модели шероховатости поверхности необходимо протестировать точность и степень пригодности указанных методов. Рассмотрим кратко суть этих методов и разработанных на их основе решений.

Метод фильтрации Фурье заключается в следующем: строится преобразование Фурье в частотной области со случайным заданием фаз и подбором амплитуд, которые удовлетворяют свойству спектральной плотности.

Пусть функция $y(t)$ описывает профиль поверхности с показателем Херста $0 < H < 1$. Тогда для спектральной плотности

$$S(\omega) \propto \frac{1}{\omega^\beta}, \quad \beta = 2 \times H + 1. \quad (1)$$

Функция спектральной плотности определяется по формуле

$$S(\omega, T) = \frac{1}{T} \times |\hat{y}(\omega, T)|^2,$$

где $\hat{y}(\omega, T)$ — преобразование Фурье исходных значений моделируемой функции.

Спектральную плотность функции $y(t)$ целесообразно представить в виде предела

$$s(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \times |\hat{y}(\omega, T)|^2.$$

На основе полученного массива амплитуд строится исходная кривая с использованием обратного преобразования Фурье. Причем реально моделируется не само непрерывное преобразование Фурье, а его дискретный аналог. Моделирование начинается с создания вектора, который является дискретным преобразованием Фурье предполагаемого фрактального объекта. Затем осуществляется обратное дискретное преобразование Фурье, которое и дает требуемую фрактальную кривую. Необходимое условие записывается выражением

$$\begin{aligned} \hat{y}_n &= \overline{\hat{y}_{N-n}} & \text{при } n = 1, 2, \dots, N/2, \\ \hat{y}_0 &= \overline{\hat{y}_0} \end{aligned}$$

где $\overline{\hat{y}_{N-n}}$ и $\overline{\hat{y}_0}$ — сопряженные комплексные числа.

Фильтрация Фурье относится к той части моделирования, когда коэффициенты преобразования удовлетворяют степенному закону (1). В дискретном виде условие выражается следующей формулой:

$$|\hat{y}_n|^2 \propto \frac{1}{n^{2H+1}} \quad \text{при } n = 1, 2, \dots, N/2.$$

Таким образом, расчеты осуществляются от 1 до $N/2$, а затем используется условие симметрии для вычисления остальных коэффициентов.

На основании метода фильтрации Фурье разработаны алгоритмы построения модели профиля шероховатости поверхности и трехмерной шероховатой поверхности. Согласно разработанным алгоритмам, в программной среде MathCAD 13 были созданы компьютерные программы «Моделирование фрактальной кривой методом фильтрации Фурье v 1.0» [2] и «Моделирование трехмерной поверхности методом фильтрации Фурье v 1.0» [3]. Примеры фрактального профиля и фрактальной шероховатой поверхности представлены на рис. 1 и 2.

При моделировании фрактальных объектов с помощью функции Вейерштрасса — Мандельброта профиль описывается следующим выражением:

$$y(x) = G^{D-1} \times \sum_{n=0}^{n \max} \gamma^{(D-2)n} \times (\cos \varphi_n - \cos(2\pi \gamma^n x + \varphi_n)),$$

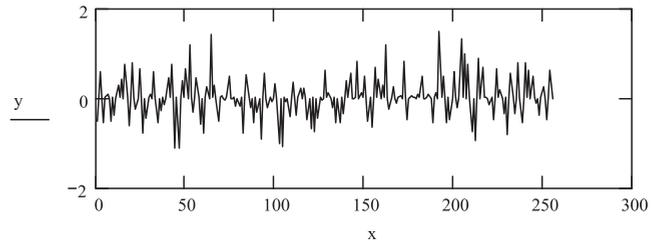


Рисунок 1 — Кривая фильтрации Фурье

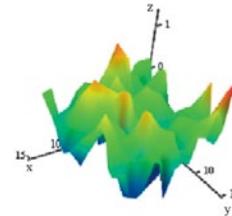


Рисунок 2 — Поверхность фильтрации Фурье

где w — комплексная функция вещественной переменной x ; G — коэффициент амплитуды изменения высоты кривой; D — фрактальная размерность кривой $1 < D < 2$; γ — параметр, контролирующий плотность частотных составляющих.

Значение G определяется как

$$G = \left(\frac{4 \times (2 - D) \times R_y^2 \times \ln \gamma}{\left(\frac{1}{\omega_{\max}^{2(2-D)}} - \frac{1}{\omega_{\min}^{2(2-D)}} \right)} \right)^{\frac{1}{2(D-1)}}.$$

Для построения фрактальных шероховатых поверхностей использовалась двумерная функция Вейерштрасса — Мандельброта

$$\begin{aligned} z(x, y) &= L \times \left(\frac{G}{L} \right)^{Ds-2} \times \left(\frac{\ln \gamma}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{n \max} \gamma^{(Ds-3)n} \times (\cos \varphi_{m,n} - \\ &- \cos \left(\frac{2\pi \gamma^n \times (x^2 + y^2)^{0.5}}{L} \times \cos \left(\arctg \left(\frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} \right) + \varphi_{m,n} \right)), \end{aligned}$$

где M — количество гребней.

На основании данного метода разработаны алгоритмы построения модели профиля шероховатости поверхности и трехмерной шероховатой поверхности. По предложенным алгоритмам в программной среде MathCAD 13 были разработаны компьютерные программы «Моделирование фрактальной кривой при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта v 1.0» [4] и «Моделирование трехмерной поверхности при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта v 1.0» [5]. Примеры фрактального профиля и фрактальной шероховатой поверхности, полученные данным методом, представлены на рис. 3 и 4.

Метод случайных сложений состоит в следующем.

1. Выбираются начальные значения аргумента $x_i = 0; 0.5; 1$.
2. В этих точках значения функции принимаются равными нулю.

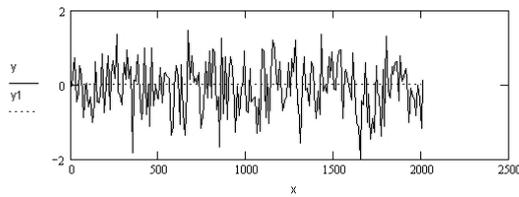


Рисунок 3 — Кривая, полученная при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта

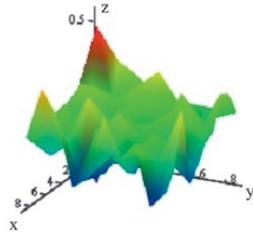


Рисунок 4 — Поверхность, полученная при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта

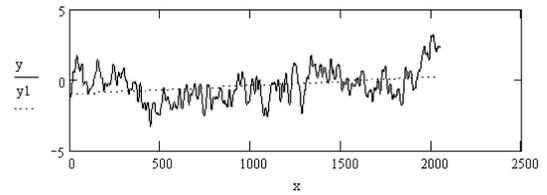


Рисунок 5 — Кривая, полученная методом случайных сложений

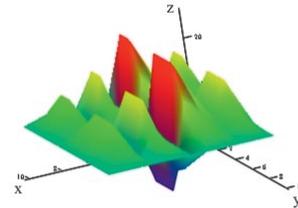


Рисунок 6 — Поверхность, полученная методом случайных сложений

3. К значениям функции прибавляются случайные числа, выбранные из нормального распределения с нулевым средним.

4. Производится интерполяция этих значений, т. е.

$$y\left(x_{\frac{i+(i+1)}{2}}\right) = \frac{y(x_i) + y(x_{i+1})}{2}.$$

5. После интерполяции дисперсия уменьшается согласно зависимости

$$\sigma_{i+1}^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{2H} \times \sigma_i^2,$$

где H — показатель Херста.

6. Выбираются новые моменты времени посредством усреднения имеющихся.

Таким образом, при использовании метода случайных сложений реализация вычисляется на диадических рациональных числах, т. е. в точках $k/2^n$ интервала $[0,1]$. Реализация строится последовательно в конечных точках 0 и 1, затем в $1/2$, потом в $1/4$ и $3/4$ и т. д.

На основании метода случайных сложений разработаны алгоритмы построения модели профиля шероховатости поверхности и трехмерной шероховатой поверхности. Согласно этим алгоритмам, в программной среде MathCAD 13 реализованы компьютерные программы «Моделирование кривой методом случайных сложений v 1.0» [6] и «Моделирование трехмерной поверхности v 1.0» [7]. Примеры фрактального профиля и фрактальной шероховатой поверхности, полученные предложенным методом, представлены на рис. 5 и 6.

Для оценки точности рассматриваемых методов моделирования фрактальных шероховатых объектов при помощи разработанного программного обеспечения были получены модели шероховатости, параметры которых взяты с реальных профилеграмм, а затем модели сравнились с оригиналами. Результаты моделирования представлены в табл. 1 — 3.

Таблица 1 — Значения параметров шероховатости поверхности, полученные с использованием метода фильтрации Фурье

Реальный профиль				Смоделированный профиль			
Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мм	Sm, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мкм	Sm, мм
0,53	2,7	0,66	0,8	0,24	1,2	0,3	0,43
0,68	3,4	0,85	0,77	0,47	2,35	0,58	0,59
0,77	3,9	0,96	0,57	0,52	2,6	0,65	0,46
0,9	4,5	1,125	0,67	0,71	3,55	0,89	0,53
0,75	3,75	0,94	0,65	0,57	2,85	0,71	0,58
0,59	2,95	0,74	0,59	0,28	1,4	0,35	0,55
0,62	3,1	0,78	0,75	0,33	1,65	0,41	0,77
1,2	6	1,5	1,2	1,1	5,5	1,4	0,47
1,225	6,125	1,53	1,12	1,4	7	1,75	0,64
1,4	7	1,75	1,31	1,35	6,75	1,68	0,69
1,4	7	1,75	1,4	1,65	8,25	2,1	0,56

Таблица 2 — Значения параметров шероховатости поверхности, полученные с использованием функции Вейерштрасса — Мандельброта

Реальный профиль				Смоделированный профиль			
Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мм	Sm, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мкм	Sm, мм
0,53	2,7	0,66	0,8	0,54	2,7	0,68	0,33
0,68	3,4	0,85	0,77	0,99	4,95	1,23	0,37
0,77	3,9	0,96	0,57	1,1	5,5	1,375	0,27
0,9	4,5	1,125	0,67	1,58	7,9	1,975	0,31
0,75	3,75	0,94	0,65	1,3	6,5	1,63	0,33
0,59	2,95	0,74	0,59	0,61	3,05	0,76	0,38
0,62	3,1	0,78	0,75	0,71	3,1	0,89	0,35
1,2	6	1,5	1,2	2,6	13	3,25	0,4
1,225	6,125	1,53	1,12	2,9	14,5	3,63	0,32
1,4	7	1,75	1,31	3,3	16,5	4,1	0,45
1,4	7	1,75	1,4	3,8	19	4,75	0,42

Таблица 3 — Значения параметров шероховатости поверхности, полученные с использованием метода случайных сложений

Реальный профиль				Смоделированный профиль			
Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мм	Sm, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мкм	Sm, мм
0,53	2,7	0,66	0,8	0,734	3,670	0,918	0,612
0,68	3,4	0,85	0,77	0,942	4,712	1,178	0,456
0,77	3,9	0,96	0,57	2,357	11,787	2,947	0,495
0,9	4,5	1,125	0,67	3,286	16,430	4,108	1,154
0,75	3,75	0,94	0,65	0,851	4,254	1,064	1,753
0,59	2,95	0,74	0,59	0,357	1,787	0,447	0,161
0,62	3,1	0,78	0,75	0,531	2,655	0,664	0,282
1,2	6	1,5	1,2	0,192	0,962	0,240	0,841
1,225	6,125	1,53	1,12	0,127	0,635	0,159	1,782
1,4	7	1,75	1,31	1,107	5,534	1,383	1,366
1,4	7	1,75	1,4	1,113	5,566	1,391	1,984

Как можно видеть из табл. 1 — 3, погрешность моделей достигает 70%, что неприемлемо. Кроме того, в ходе работы был выявлен еще ряд недостатков методов фильтрации Фурье и моделирования при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта.

1. Метод моделирования с использованием функции Вейерштрасса — Мандельброта дает хорошие результаты только при значениях фрактальной размерности $D = 1.6 \pm 0.05$, однако фрактальная размерность реальных профилей не всегда имеет такое значение, а значит, при использовании функции Вейерштрасса — Мандельброта не выполняется теорема подобия, поэтому полного подобия между моделью и реальным объектом не достигается.

2. Метод фильтрации Фурье дает хорошие результаты только при значениях исходной шероховатости $Ra > 1.0$. При меньших значениях шероховатости погрешность увеличивается многократно. Неточность метода фильтрации Фурье объясняется нестационарностью профилей шероховатости поверхности при $Ra < 1.0$, а, как известно, Фурье-анализ затруднительно применять для обработки нестационарных сигналов.

3. В ходе работы не выявлено каких-либо способов управления параметрами точности моделей, построенных с использованием этих двух методов, без нарушения фундаментальных теорем подобия.

4. Оба метода требуют большого количества вычислений по достаточно громоздким зависимостям, поэтому осуществление их на аппаратном уровне весьма затруднительно.

Главным достоинством классического метода случайных сложений является реализация простых вычислительных операций, которые несложно реализовать на аппаратном уровне, поэтому возможность практической реализации такого метода (в сравнении с остальными) существенно проще. Кроме того, алгоритм метода случайных сложений вполне возможно приспособить к построению моделей реальных профилей шероховатости поверхности.

Главным затруднением при адаптации метода случайных сложений является отсутствие явно выраженной расчетной зависимости, описывающей профиль, потому модернизация алгоритма производилась эмпирическим путем.

В результате компьютерного моделирования профилей с параметрами, взятыми с реальных профилограмм, было установлено, что в классический алгоритм метода случайных сложений необходимо внести ряд изменений, чтобы приспособить его к построению профилей шероховатости поверхности. Изменения эти следующие.

1. Выражение σ в скорректированном алгоритме принимает вид

$$\sigma_{i+1} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^{2H}} \times \sigma_i.$$

2. Введено условие корректировки дисперсии, которая используется при реализации алгоритма в зависимости от величины исходных данных,

$$\sigma_{axe}^2 = \begin{cases} \sigma_{дей}^2, \text{ при } \sigma_{дей}^2 < 4 \\ 4 \times \sigma_{дей}^2, \text{ при } 4 < \sigma_{дей}^2 < 16 \\ 16 \times \sigma_{дей}^2, \text{ при } 16 < \sigma_{дей}^2 < 36 \end{cases} \quad (2)$$

3. В ходе выполнения вычислений в модифицированном алгоритме метода случайных сложений производится снижение зашумленности профиля с применением сглаживания на основе функции Гаусса. Установлена следующая зависимость ширины окна сглаживания b от показателя Херста:

$$b = \begin{cases} 10, \text{ при } H < 0.75 \\ 20, \text{ при } 0.75 < H < 0.85. \\ 30, \text{ при } 0.85 < H < 0.9 \end{cases} \quad (3)$$

Изменение ширины окна сглаживания объясняется тем, что форма кривой меняется с изменением показателя Херста. С увеличением показателя Херста исходный профиль становится менее зашумленным, следовательно, необходимо более мощное сглаживание. Такая зависимость не противоречит теории, так как при приближении показателя Херста к 1 исходный профиль приближается к прямой линии.

4. В алгоритм был введен критерий адекватности модели. В ходе компьютерного моделирования установлено, что при совпадении величины действительного среднеквадратического отклонения и среднеквадратического отклонения математической модели результаты получаются удовлетворительными

$$\Delta_{\sigma} = \left| \frac{\sigma_{mod} - \sigma_{дей}}{\sigma_{mod}} \right| \times 100\% \leq 10\%, \quad (4)$$

где σ_{mod} — среднеквадратическое отклонение модели; $\sigma_{дей}$ — среднеквадратическое исходных данных.

Принципиально требования по точности можно увеличивать и далее, но, как показывают результаты компьютерного моделирования, при дальнейшем увеличении требований к точности резко увеличивается число итераций, необходимых для получения адекватного результата, но при этом снижается производительность алгоритма. Если для отклонения $\Delta_{\sigma} \leq 10\%$ среднее число обращений к алгоритму составляет 3 — 4 раза, то при $\Delta_{\sigma} \leq 5\%$ это число составляет уже 15 — 20 и время отработки программы значительно увеличивается, хотя точность моделирования при этом повышается лишь

на несколько процентов. Поэтому оптимальным значением критерия адекватности является значение, задаваемое выражением (4).

Данные, полученные при помощи модифицированного алгоритма случайных сложений, представлены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, погрешность по всем параметрам шероховатости лежит в пределах 10%, что вполне удовлетворительно для решения поставленных задач. Кроме того, модифицированный метод случайных сложений имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с остальными.

1. Нет необходимости во введении каких-либо дополнительных критериев адекватности модели, имеются широкие возможности повышения точности модели за счет корректировки параметров алгоритма;

2. В 90% случаев значения, полученные посредством моделирования, меньше, чем реальные, а значит, вероятность получения бракованной детали снижается.

Таблица 4 — Значения параметров шероховатости поверхности, полученные при помощи модифицированного метода случайных сложений

Реальный профиль				Смоделированный профиль			
Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мм	Sm, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мкм	Sm, мм
0,53	2,7	0,66	0,8	0,54	2,7	0,675	0,76
0,68	3,4	0,85	0,77	0,62	3,1	0,775	0,74
0,77	3,9	0,96	0,57	0,73	3,65	0,91	0,59
0,9	4,5	1,125	0,67	0,89	4,45	1,13	0,74
0,75	3,75	0,94	0,65	0,78	3,9	0,975	0,69
0,59	2,95	0,74	0,59	0,56	2,8	0,7	0,63
0,62	3,1	0,78	0,75	0,61	3,05	0,763	0,78
1,2	6	1,5	1,2	1,1	5,5	1,375	1,31
1,225	6,125	1,53	1,12	1,2	6,0	1,5	1,14
1,4	7	1,75	1,31	1,35	6,75	1,69	1,23
1,4	7	1,75	1,4	1,42	7,1	1,78	1,5

Литература

1. Федер Е. Фракталы. М. : Мир, 1991. 261 с.
2. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Моделирование фрактальной кривой методом фильтрации Фурье в 1.0. М. : ВНТИЦ, 2008. № 50200801853.
3. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Моделирование трехмерной поверхности методом фильтрации Фурье в 1.0. М. : ВНТИЦ, 2008. № 50200801855.
4. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Моделирование фрактальной кривой при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта в.1.0. М. : ВНТИЦ, 2008. № 50200801855.
5. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Моделирование трехмерной поверхности при помощи функции Вейерштрасса — Мандельброта в. 1.0. М. : ВНТИЦ, 2008. № 50200801855.
6. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Моделирование кривой методом случайных сложений в 1.0. М. : ВНТИЦ, 2008. № 50200800790.
7. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Моделирование трехмерной поверхности в 1.0. М. : ВНТИЦ, 2008. № 50200800789.

References

1. E. Feder. Fraktaly [Fractals]. M.: Mir, 1991 – 261 p.
2. A.K. Ostapchuk, V.E. Ovsyannikov, E.Yu. Rogov. Modelirovaniye krivoy metodom sluchainykh slozheniy v 1.0 [Curve modelling using the random addition method v 1.0]. M.: VNTIC, 2008. № 50200800790.
3. A.K. Ostapchuk, V.E. Ovsyannikov, E.Yu. Rogov. Modelirovaniye trekhmernoy poverkhnosti v 1.0 [3-D surface modelling v 1.0]. M.: VNTIC, 2008. № 50200800789.
4. A.K. Ostapchuk, V.E. Ovsyannikov, E.Yu. Rogov. Modelirovaniye trekhmernoy poverkhnosti pri pomoschi funktsii Veiershtrassa-Mandelbrota v 1.0 [3-D surface modelling using the Weierstrass-Mandelbrojt function v 1.0]. – M.: VNTIC, 2008. № 50200801855.
5. A.K. Ostapchuk, V.E. Ovsyannikov, E.Yu. Rogov. Modelirovaniye trekhmernoy poverkhnosti metodom filtratsii Furiye v 1.0 [3-D surface modelling using Fourier filtration method]. M.: VNTIC, 2008. № 50200801855.
6. A.K. Ostapchuk, V.E. Ovsyannikov, E.Yu. Rogov. Modelirovaniye fraktalnoy krivoy metodom filtratsii Furiye v 1.0 [Fractal curve modelling using Fourier filtration method v 1.0]. M.: VNTIC, 2008. № 50200801853.
7. A.K. Ostapchuk, V.E. Ovsyannikov, E.Yu. Rogov. Modelirovaniye fraktalnoy krivoy pri pomoshchi funktsii Veiershtrassa-Mandelbrota v. 1.0 [Fractal curve modelling using the Weierstrass-Mandelbrojt function v 1.0]. M.: VNTIC, 2008. № 50200801855.

УДК 621.85

Петр Витальевич Яковлев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НОВОЙ РАЗДАТОЧНОЙ КОРОБКИ

Petr V. Yakovlev, PhD in Engineering, Assistant Professor at Motor Vehicles Chair of South Ural State University (SUSU, Chelyabinsk).

Testing Procedure For A New Transfer Box

Аннотация

В процессе создания новых и производства серийных агрегатов машин показатели их долговечности должны проверяться экспериментальным путем. Для сокращения сроков и повышения информативности эксперименты проводят по методикам ускоренных испытаний. В статье приводится методика ускоренных ресурсных испытаний новой раздаточной коробки.

Ключевые слова:

раздаточная коробка, зубчатые колеса, эксперимент, стенд.

Abstract

The operation of comparing options at road design is a labour-consuming one. It is suggested to simplify calculations by a simpler calculation method using not all the longitudinal profile elements, but three equivalent elements only.

Key words:

highway, option, design, equivalent longitudinal profile.

В настоящее время широкое применение для оценки ресурса деталей, сборочных единиц и машин в сборе получили стендовые ускоренные ресурсные испытания. Они позволяют производить оценку ресурса изделий в значительно более короткие сроки и с меньшими затратами по сравнению с эксплуатационными испытаниями.

Автором статьи на протяжении ряда лет в расчетном и экспериментальном плане проводились исследования схемы ступенчатой механической раздаточной коробки (РК) с переключением передач во время движения автомобиля за счет изменения межосевого расстояния [1, 2]. Ввиду особенности способа переключения среди множества деталей рассматриваемой РК в особую группу необходимо выделить зубчатые колеса.

Методология экспериментальных исследований (рис. 1) содержит следующие этапы:

- обобщение отечественного и зарубежного опыта по исследуемому вопросу в различных отраслях машиностроения;
- аналитические исследования (методика расчета режимов нагружения, описание результатов испытаний и т. д.);
- разработка конструкции универсального нагрузочного стенда, экспериментальные исследования (проведение ресурсных испытаний);

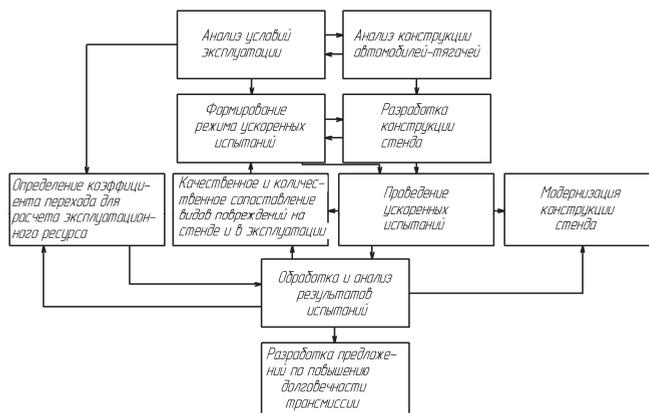


Рисунок 1 — Схема методологии исследований

- разработка предложений и рекомендаций по повышению долговечности и совершенствованию трансмиссий автомобилей-тягачей, а также по дальнейшему совершенствованию конструкции стенда.

Обработка и анализ результатов проведенных стендовых испытаний, количественное и качественное сопоставление видов повреждений деталей трансмиссий на стенде и в эксплуатации дали возможность:

- проверить правильность основных положений методики;
- установить пригодность стендового оборудования и наметить пути его модернизации;
- определить коэффициент перехода для прогноза эксплуатационного ресурса и дать рекомендации по повышению долговечности испытанных трансмиссий.

Нагружение испытываемых шестерен РК осуществлялось в тех же корпусах, что и в эксплуатации. При этом достигалось воспроизведение основных эксплуатационных условий работы (смазочный и температурный режимы, влияние жесткости корпусов и валов и т. д.). Для испытания новой конструкции РК нагружающий момент задавался в соответствии с рекомендациями [3] равным 1,3 от расчетного. Исследования по определению предельно допустимого нагрузочного режима при ускоренных испытаниях зубчатых передач показали, что в качестве ограничительного критерия целесообразно принять состояние зуба, при котором трещина (излом зуба) или его части равна или более его высоты (или $2m$). На основании исследований была предложена зависимость, позволяющая определить величину максимально допустимого по излому нагружающего момента в зависимости от геометрии зацепления и скоростей скольжения.

Также проводились испытания зубчатых колес на контактную выносливость по методике, разработанной НАТИ [3, 4]. Испытаниям подвергались три комплекта шестерен, которые перед обкаткой проходили контроль на соответствие требованиям чертежей. Обкатка испытываемых шестерен производилась при следующих режимах нагружения:

- без нагрузки — 7 ч;
- с нагрузкой 25% — 7 ч;
- с нагрузкой 50% — 7 ч.

За 100% нагрузки принимался заданный методикой испытаний максимальный момент $M_{и}$. Испытания проводились в течение 500 ч при постоянной нагрузке, при этом для увеличения удельной контактной нагрузки колеса были смещены вдоль оси на половину ширины зуба. Температура масла во время испытаний с помощью охлаждающего устройства поддерживалась в пределах 70 — 80°C.

При определении изгибной выносливости зубьев испытываемые шестерни устанавливались в своих корпусах, а нагружающий момент составлял 1,3 от наибольшего момента в эксплуатации. Продолжительность испытаний определялась по формуле

$$t = \frac{10^7}{10n_{\omega}}, \quad (1)$$

где n_{ω} — число оборотов ведущей шестерни, об/мин.

На рис. 2 схематично представлен стенд для испытаний раздаточных коробок замкнутым способом. Замкнутый контур образован с помощью замыкающих редукторов 2 и раздаточ-

ной коробки 4, аналогичной испытываемой 3. Привод системы осуществляется от электродвигателя 6, нагружение — с помощью планетарного нагружателя 1. Величина нагрузки в замкнутом контуре контролируется с помощью датчика крутящего момента 5.

На указанном стенде с замкнутым потоком нагружение испытываемых объектов осуществляется за счет внутренних сил сопротивления замкнутого силового контура с циркулирующей мощностью. Преимущество стенда — его высокая экономичность, так как мощность приводного двигателя определяется только потерями (механическими, электрическими и т. д. в зависимости от способа замыкания) в контуре. Однако наличие дополнительных устройств для замыкания усложняет конструкцию стенда и в известной степени снижает его надежность.

Посредством имитационного моделирования была получена уточненная оценка интенсивности накопления усталостных повреждений для конкретного спектра нагрузок, присущего исследуемой конструкции РК, а также было объективно учтено влияние и высоких уровней нагружения, и напряжений ниже предела выносливости. Составление программ испытаний производилось на основании результатов статистической обработки записей нагрузок в эксплуатации.

Случайный характер чередования в эксплуатации нагрузок различной величины с достаточной точностью заменим эквивалентным по повреждающему воздействию воспроизведением циклов напряжений, входящих в состав случайного процесса.

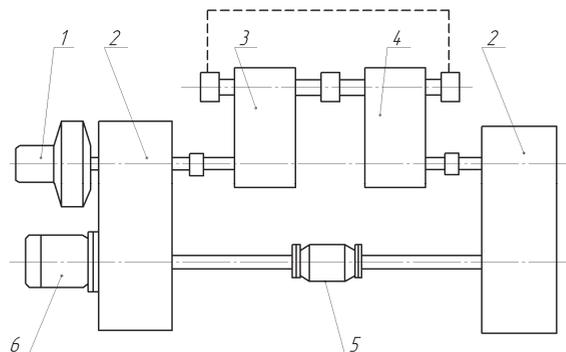


Рисунок 2 — Схема стенда для испытаний раздаточных коробок:
 1 — планетарный нагружатель; 2 — замыкающий редуктор;
 3 — испытываемая коробка; 4 — замыкающая коробка; 5 — датчик крутящего момента; 6 — приводной электродвигатель

В основу такого прогнозирования положим гипотезу суммирования повреждений [5], в общем виде представленную как

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = a, \quad (2)$$

где n_i — число циклов действия напряжений данного уровня; N_i — число циклов до разрушения при напряжениях этого уровня;

a — величина, характеризующая сопротивляемость детали действующим нагрузкам в зависимости от ее материала, размеров, а также условий нагружения.

При последовательном воспроизведении нагрузочных блоков трансмиссию доводили до разрушения. Эксплуатационная долговечность при этом определялась по формуле

$$L = n_{\sigma} \cdot \lambda, \quad (3)$$

где n_{σ} — количество нагрузочных блоков;
 λ — временной эквивалент одного программного блока.

Основной задачей ресурсных испытаний было воспроизведение нагрузочного режима, эквивалентного по повреждающему воздействию спектру эксплуатационных нагрузок, определяемому величиной (амплитудой) действующих нагрузок, их чередованием и длительностью действия. Проведенными исследованиями установлено, что замена спектра эксплуатационных нагрузок некоторым упорядоченным (нагрузочным) блоком должна производиться с таким расчетом, чтобы каждый уровень нагрузок во время испытаний воспроизводился не менее 10 — 20 раз. Количество ступеней в блоке должно быть не менее 6 — 8. Параметры нагрузочного блока — величины нагрузок и продолжительность их действия — определяют параметры приводного электродвигателя и статистические характеристики нагрузок на валу исполнительного органа. Основные исходные данные для расчета параметров блока — устойчивые моменты на валах приводного электродвигателя и исполнительного органа $M_{уСТ}$ и $M_{иСТ}$ соответствующие эксплуатационному режиму работы и связанные соотношением

$$M_{иСТ} = M_{уСТ} \cdot i_{ТР} \cdot \eta_{ТР} \quad (4)$$

где $i_{ТР}$ и $\eta_{ТР}$ — соответственно передаточное отношение и коэффициент полезного действия трансмиссии.

В качестве исходных данных для расчета принимаются также статистические характеристики моментов на валу исполнительного органа:
 математическое ожидание моментов

$$\bar{M}_u = M_{иСТ},$$

среднеквадратичное отклонение

$$\sigma M_u = \bar{M}_u \cdot v_{ТР}, \quad (5)$$

максимальный длительно действующий момент

$$M_{u\max} = M_u + 3\sigma M_u = \bar{M}_u (1 + 3 v_{ТР}),$$

где $v_{ТР}$ — коэффициент вариации нагрузки в трансмиссии к исполнительному органу, определяемый по ОСТ 12.44.109-79.

Закон распределения моментов на первичном валу раздаточной коробки принимается нормальным

$$f(M_u) = \frac{1}{\sigma_{Mu} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(M_u - \bar{M}_u)^2}{2\sigma_{Mu}^2} \right] \quad (6)$$

где M_u — текущее значение момента на валу от 0 до $M_{u\max}$.

С учетом конкретных значений статистических характеристик ($\bar{M}_u = 8$ кН·м; $\sigma_{Mu} = 0,32$ кН·м; $M_{u\max} = 17,6$ кН·м) закон распределения для автомобиля-тягача «Урал» принимает вид

$$f(M_u) = 0,125 \exp \left[-0,0488(M_u - 8)^2 \right]. \quad (7)$$

Для построения нагрузочного блока необходимо знать интегральную функцию распределения моментов, суммирующую все действующие на трансмиссию нагрузки и описываемую интегральной кривой, выражение которой

$$F(M_u) = \int_{m=1}^n f(M_u) dM_u \quad (8)$$

с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть представлено в упрощенном виде

$$F(M_u) \approx \sum_{m=1}^n f(M_u) \cdot \Delta M_u, \quad (9)$$

где ΔM_u — интервал изменения момента M_u в диапазоне от 0 до $M_{u\max}$;

m и n — порядковый номер и число значений M_u в этом диапазоне.

Задаваясь величиной ΔM_u и принимая ряд значений M_u в диапазоне $0 \dots M_{u\max}$, получаем соответствующие значения $F(M_u)$, по которым производим построение интегральной кривой.

На рис. 3 приведено построение интегральной кривой применительно к исследуемому в работе трансмиссии автомобиля-тягача «Урал». Интегральная кривая аппроксимируется ломаной линией, представляющей собой нормальный (без форсирования) блок нагружения, соответствующий расчетной долговечности трансмиссии, принимаемой не менее 5000 ч, так как он построен с учетом полного спектра эксплуатационных нагрузок. Для ускорения испытаний принято воспроизводить лишь нагрузки, оказывающие наибольшее повреждающее воздействие (без изменения видов и характера повреждений). На основании многочисленных исследований в настоящее время установлено, что амплитуды напряжений, меньшие 0,5 — 0,7 напряжений предела выносливости, не оказывают влияния на процесс накопления усталостных повреждений. На основании изложенного полагаем, что для ускорения испытаний могут быть использованы уплотнение рабочих циклов и усечение спектра нагрузок.

Из расчета испытываемой трансмиссии на прочность определяется условная нагрузка $M_{зп}$ в зацеплении i -й пары, в которой одно из зубчатых колес имеет наименьший запас прочности.

Соответствующая нагрузка на валу исполнительного органа M_u определяется из выражения

$$M_u = M_{зп} \cdot i_i \cdot \eta_i, \quad (10)$$

где i_i и η_i — соответственно передаточное отношение и КПД части трансмиссии между i -й парой и выходным валом.

Форсированный нагрузочный блок получается аппроксимацией ломаной линией отрезка интегральной кривой после отбрасывания нагрузок менее $0,5 M_u$. Продолжительность блока в относительных единицах $T'_{\text{бл}}$ определяется как разность между значениями $\sum f(M_u)$

$$T'_{\text{бл}} = \sum f_{\text{бл}}(M_u) - \sum f_{M_{\gamma}}(M_u), \quad (11)$$

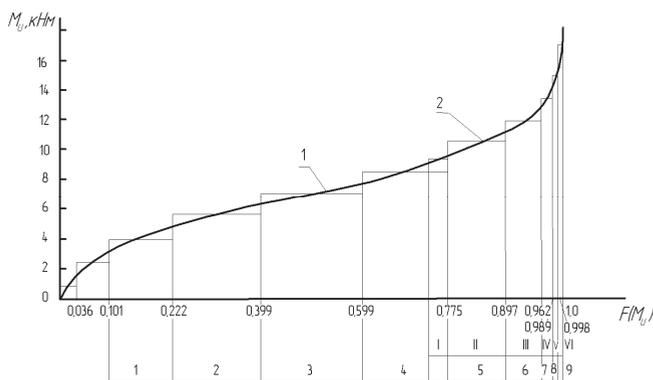


Рисунок 3 — Определение параметров режима нагружения при ускоренных ресурсных испытаниях РК автомобиля-тягача «Урал»

где $\sum f_{\text{бл}}(M_u)$ и $\sum f_{M_\gamma}(M_u)$, соответствующие блоку в целом и моменту M_γ , определяются по интегральной кривой.

Продолжительность ступеней в долях от продолжительности блока

$$t'_i = \frac{\sum f_{i+1}(M_u) - \sum f_i(M_u)}{T_{\text{бл}}}, \quad (12)$$

где i — порядковый номер ступени в блоке.

Продолжительность отдельных ступеней

$$t_i = t'_i \cdot T_{\text{бл}}$$

Продолжительность блока $T_{\text{бл}}$ принимается из организационных соображений с таким расчетом, чтобы она укладывалась в одну или две смены.

Коэффициент форсирования определяется из отношения

$$K_\phi = \frac{\sigma_{\text{эвф}}}{\sigma_{\text{экви}}}, \quad (13)$$

где $\sigma_{\text{эвф}}$ и $\sigma_{\text{экви}}$ — эквивалентные напряжения форсированного и нормального блоков нагружения, определяемые из выражения

$$\sigma_{\text{эвф}} = \sqrt[q]{\frac{\sum_{i=1}^K \sigma_i^q \cdot t_i}{\sum_{i=1}^K t_i}}, \quad (14)$$

где i и K — порядковый номер и число ступеней режима нагружения;

σ_i — напряжение i -й ступени;

t_i — продолжительность i -й ступени;

q — показатель наклона кривой усталости для наиболее нагруженной детали.

Опыт проведенных ускоренных испытаний зубчатых передач раздаточной коробки автомобиля-тягача «Урал» позволил установить, что для обеспечения тождественности физических процессов разрушений на стенде и в эксплуатации величина коэффициента форсирования не должна превышать 1,5.

Оценка предполагаемого ресурса в эксплуатации серийной продукции осуществляется с помощью коэффициента перехода K_n , равного отношению ресурса в эксплуатации R_c к ресурсу при стендовых испытаниях R_s

$$K_n = \frac{R_s}{R_c}, \quad (15)$$

Средняя наработка на стенде оценивалась по результатам испытаний трех раздаточных коробок, достигших предельного состояния, при котором прекращалась их эксплуатация. С помощью определенного таким способом коэффициента перехода может быть произведена оценка эксплуатационного ресурса опытных машин. Доля моментов λ , исключаемых из нормального блока, равна [6] отношению вероятностей попадания случайного значения момента на отрезках от 0 до M_γ и от 0 до $M_{u\text{max}}$ определяемых как для подчиненной нормальному закону случайной величины

$$P(0 < x < M_\gamma) = \Phi^*\left(\frac{M_\gamma - \bar{M}_u}{\delta_{M_u}}\right) - \Phi^*\left(\frac{0 - \bar{M}_u}{\delta_{M_u}}\right), \quad (16)$$

$$P(0 < x < M_{u\text{max}}) = \Phi^*\left(\frac{M_{u\text{max}} - \bar{M}_u}{\delta_{M_u}}\right) - \Phi^*\left(\frac{0 - \bar{M}_u}{\delta_{M_u}}\right), \quad (17)$$

где Φ^* — табулированные значения нормальной функции распределения.

Тогда

$$\lambda = \frac{P(0 < x < M_\gamma)}{P(0 < x < M_{u\text{max}})} \quad (18)$$

Подставляя после упрощения формулу $\delta M_u = \bar{M}_u \cdot V_{\text{гр}}$ получим

$$\lambda = 1 - \frac{\Phi^*\left(\frac{1}{V_{\text{гр}}} - \frac{M_\gamma}{M_u}\right)}{\Phi^*\left(\frac{1}{V_{\text{гр}}}\right)}, \quad (19)$$

Продолжительность действия моментов, исключенных из нагруженного режима,

$$T_1 = \lambda \cdot T, \quad (20)$$

где T_1 — расчетная долговечность.

Подставляя в уравнение кривой усталости

$$\delta^q \cdot N = \text{const},$$

соотношение (13), получим

$$\delta_{\text{эвф}}^q (T - T_1) = \delta_{\text{эвф}}^q \cdot T_{\text{исп}}$$

откуда, используя выражение (19), получим

$$K_n = \frac{T}{T_{\text{исп}}} = \frac{K_\phi^q}{1 - \lambda}. \quad (21)$$

Полученное выражение позволило определить расчетный коэффициент перехода K_n в зависимости от коэффициента форсирования K_ϕ и уровня отбрасываемых нагрузок. Точность определения K_n в значительной степени зависела от точности показателя наклона кривой усталости q .

Вывод. Таким образом, опыт проведенных ускоренных испытаний зубчатых передач раздаточной коробки автомобиля-тягача «Урал» позволил установить, что для обеспечения

тождественности физических процессов разрушений на стенде и в эксплуатации коэффициент форсирования не должен превышать 1,5. Кроме того, на основании проведенных исследований установлено, что амплитуды напряжений, меньшие 0,5 — 0,7 напряжений предела выносливости, не оказывают влияния на процесс накопления усталостных повреждений, поэтому полагаем, что для ускорения испытаний могут быть использованы уплотнение рабочих циклов и усечение спектра нагрузок.

Литература

1. Драгунов Г.Д., Яковлев П.В., Гонтарев Е.П., Мартынов А.Н. Новая раздаточная коробка для автомобиля высокой проходимости // *Автомобильная промышленность*. 2010. № 7. С. 18 — 20.
2. Яковлев П.В., Драгунов Г.Д. Математическое моделирование трансмиссии автомобиля «Урал» с новой раздаточной коробкой // *Транспорт Урала*. 2012. № 1 (32). С. 148 — 151.
3. Величкин И.Н., Зубиетова М.П. Общие вопросы методик ускоренных испытаний // *Труды НАТИ*, 1970. Вып. 209.
4. Величкин И.Н. Существующие методы ускоренных износных испытаний двигателей. М. : ОНТИ НАТИ, 1957. Вып. 50.
5. Машины и стенды для испытания деталей / В.Л. Гадолин, В.А. Дроздов, В.Н. Иванов и др. М. : Машиностроение, 1979. 343 с.
6. Ксеневиц И.П., Гоберман В.А., Гоберман Л.А. Наземные тягово-транспортные системы. Т. 1. М. : Машиностроение, 2003. 743 с.

References

1. G.D. Dragunov. Novaya razdatochnaya korobka dlya avtomobilya vysokoy prokhodimosti [New transfer box for cross-country vehicle] / G.D. Dragunov, P.V. Yakovlev, E.P. Gontarev, A.N. Martynov // *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2010. № 7. P. 18-20.
2. P.V. Yakovlev, G.D. Dragunov. Matematicheskoye modelirovaniye transm issii avtomobilya "Ural" s novoy razdatochnoy korobkoy [Mathematical modelling of Ural vehicle with a new transfer box] // *Transport Urala [transport of the Urals]*. 2012. № 1 (32). P. 148 – 151.
3. I.N. Velichkin. Suschestvuyuschiye metody uskorenykh iznosnykh ispytaniy dvigateley [Existing methods for accelerated engine wear-out tests]. M.: ONTI NATI, 1957. Vyp. 50.
4. I.N. Velichkin, M.P. Zubiyetova. Obschiye voprosy metodik uskorenykh ispytaniy [General issues of accelerated testing procedures] // *Tr. NATI*, 1970. Vyp. 209.
5. Mashiny i stendy dlya ispytaniya detaley [Part testing machines and benches] / V.L. Gadolin, V.A. Drozdov, V.N. Ivanov et al. M.: Mashinostroyeniye, 1979. 343 p.
6. I.P. Ksenevitch. Nazemnye tyagovo-transportnye sistemy [Ground-based hauling and transport systems]. Tom 1 / I.P. Ksenevitch, V.A. Goberman, L.A. Goberman. – M.: Mashinostroyeniye, 2003. – 743 p.

УДК 621.19

Михаил Андреевич Мацулевич, аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск,
Евгений Анатольевич Лазарев, доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), Челябинск,

ВЛИЯНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ НА ТОПЛИВНУЮ ЭКОНОМИЧНОСТЬ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Mikhail A. Matsulevitch, postgraduate student at Internal Combustion Engines chair of South Ural State University (SUSU).
Evgeniy A. Lazarev, DSc in Engineering, Professor at Internal Combustion Engines chair of South Ural State University (SUSU).

Impact Of Exhaust Gas Recirculation On Gasoline Engine Fuel Efficiency

Аннотация

Показано влияние рециркуляции отработавших газов на топливную экономичность бензинового двигателя, работающего на режимах высокой и полной нагрузки при качественном регулировании мощности путем изменения состава свежего заряда (т. е. с разбавлением отработавшими газами).

Улучшение экономических показателей двигателей внутреннего сгорания в настоящее время является одним из наиболее актуальных направлений в развитии мирового моторостроения. Это обуславливает появление новых вспомогательных систем и методов их управления совместно с двигателем.

Ключевые слова: рециркуляция отработавших газов, качественное регулирование мощности, топливная экономичность.

Abstract

A literature survey is given, the impact of exhaust gas recirculation on the fuel efficiency of gasoline engine, operating in the high and full load modes is shown, with quality power level control by changing the incoming charge composition (i.e. with dilution by exhaust gases).

Improving the economic parameters of internal combustion engines is at present one of the most topical areas in global motor building development. It conditions the appearance of new auxiliary systems and methods of their control together with the engine.

Key words: Exhaust gas recirculation; quality power level control; fuel efficiency.

Трудно сегодня представить себе человеческую цивилизацию без автотракторной и специальной техники, в которой силовым агрегатом является поршневой двигатель внутреннего сгорания (ПДВС), в частности бензиновый двигатель. Однако производимые им выбросы негативно влияют на окружающую среду, человека и поэтому нормируются [1].

Рециркуляция отработавших газов (РОГ) — это процесс, при котором часть отработавших газов (ОГ) перепускается из выпускной системы ДВС во впускную. В бензиновых двигателях с внешним смесеобразованием, как правило, перепускаемые отработавшие газы смешиваются с топливовоздушной смесью в области за дроссельной заслонкой. При работе двигателя с рециркуляцией отработавших газов в камере сгорания снижается температура и скорость сгорания свежего заряда. В результате уменьшается количество образовавшегося соединения азота и кислорода [2 — 4]. Под свежим зарядом здесь понимается смесь из воздуха, топлива и рециркулируемых газов.

Помимо постоянно ужесточающихся экологических показателей предъявляются все большие требования к топливной экономичности бензиновых двигателей. Это связано с ограниченными нефтяными ресурсами, являющимися сырьем при производстве топлива, и ростом цен на углеводородные топлива.

В работе [3] оценивалось влияние рециркуляции отработавших газов на некоторые характеристики двигателя. На частичных режимах работы двигателя анализировалась возможность компенсации отрицательного влияния подачи отработавших газов на впуске повышением коэффициента наполнения цилиндра свежим зарядом с использованием полностью открытой дроссельной заслонки (ДЗ) для устранения дросселирования потока. С этой целью характеристики бензинового двигателя определялись при трех разных условиях (рис. 1а) [3]: полностью открытая дроссельная заслонка без рециркуляции ОГ; частично открытая дроссельная заслонка без рециркуляции ОГ; полностью открытая дроссельная заслонка с рециркуляцией ОГ в таком

количестве, которое бы обеспечивало величину крутящего момента $M_{кр}$, равную величине крутящего момента при работе двигателя с частично открытой дроссельной заслонкой без рециркуляции ОГ (т. е. предыдущий режим).

На всех режимах измерения угол опережения зажигания (УОЗ) был оптимальным. При работе двигателя на частичных нагрузках с рециркуляцией отработавших газов индикаторный коэффициент полезного действия (КПД) η находится в пределах 0,37 — 0,39, а на том же режиме работы ДВС, но без рециркуляции отработавших газов индикаторный КПД составляет 0,34 — 0,36 (рис. 1в) [3]. В исследуемом диапазоне частот вращения коленчатого вала n (1500 — 2500 мин⁻¹) наблюдалось стабильное снижение удельного эффективного расхода топлива g_e примерно на 25 г/кВт·ч (рис. 1б) [3]. Улучшение показателей объясняется снижением работы насосных ходов (процессы выпуска и впуска) при одинаковой нагрузке, тепловых потерь в стенки цилиндра и уменьшением степени диссоциации двуокиси углерода в монооксид углерода вследствие снижения температуры сгорания.

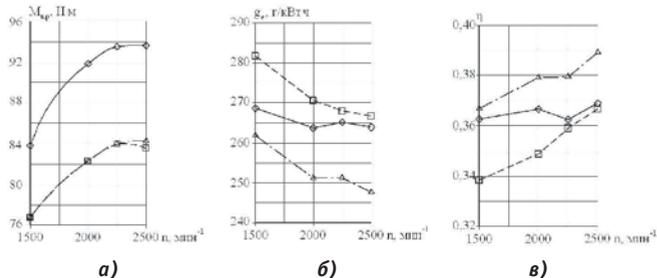


Рисунок 1 — Изменение крутящего момента $M_{кр}$ (а), удельного эффективного расхода топлива g_e (б) и индикаторного КПД (в) по скоростной характеристике бензинового двигателя (◇ — полностью и □ — частично открытая ДЗ без РОГ, △ — полностью открытая ДЗ с РОГ)

В связи с этим одним из направлений развития технологии рециркуляции отработавших газов, наряду со снижением выбросов окислов азота, может стать снижение расхода топлива. Нагрузка в бензиновых двигателях с искровым зажиганием регулируется количеством и эффективностью выделенной теплоты от сжигания топлива, которая зависит от количества и качества топливовоздушной смеси, поданной в цилиндры. Для режимов дросселирования (частичного открытия дроссельной заслонки) характерны невысокий коэффициент наполнения и повышенная работа совершения насосных ходов. Все это приводит к увеличению удельного эффективного расхода топлива. При полном открытии дроссельной заслонки работа насосных ходов будет минимальна, а коэффициент наполнения стремится к максимальному значению (для заданной частоты вращения коленчатого вала). При этом на частичных нагрузках работа двигателя некоторое количество топливовоздушной смеси, поступающей в цилиндры ДВС, необходимо замещать инертными газами.

Таким образом, на основных эксплуатационных режимах можно управлять энергетическими показателями — мощностью и крутящим моментом, изменяя состав

свежего заряда, подаваемого в цилиндры. В этом случае можно говорить о качественном регулировании мощности двигателя. В обычных поршневых двигателях внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием, как известно, осуществляется количественное регулирование мощности.

Следует отметить, что управление энергетическими показателями двигателя с помощью РОГ возможно не во всем диапазоне режимов работы, так как на малых нагрузках необходимо замещать большое количество свежей смеси отработавшими газами. Это ухудшает воспламеняемость заряда, поступившего в цилиндры, и приводит к возникновению пропусков воспламенения.

Помимо частичных нагрузок с помощью рециркуляции отработавших газов можно улучшить работу двигателя при максимальных нагрузках на малых частотах вращения коленчатого вала. Возникновение детонации вынуждает использовать поздние УОЗ, что ухудшает процесс сгорания и приводит к повышению расхода топлива. Использование рециркуляции отработавших газов в бензиновом двигателе позволяет увеличивать угол опережения зажигания без опасения возникновения детонационного сгорания. Данный эффект при высоких нагрузках и малых частотах вращения коленчатого вала дает возможность использовать углы опережения зажигания, близкие к теоретически оптимальным [3].

Согласно изложенному методу, проведено теоретическое исследование двигателя ВАЗ-21124, работающего при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин⁻¹ и полной нагрузке. Степень рециркуляции отработавших газов $k_{РОГ}$ принимается как отношение объема рециркулируемых отработавших газов к объему свежего заряда (т. е. совокупности топливовоздушной смеси и рециркулируемых отработавших газов). Как известно, при увеличении коэффициента избытка воздуха α достигается лучшая экономичность. Целесообразная степень рециркуляции отработавших газов (рис. 2) лежит в пределах 3%. На данном режиме работы удельный индикаторный расход топлива снижается на 25 г/кВт·ч, однако увеличиваются максимальное давление цикла p_{max} и максимальная температура цикла T_{max} , что может негативно сказаться на других показателях двигателя, например ресурсе и уровне издаваемого им шума.

Согласно регулировочной характеристике бензинового двигателя, по углу опережения зажигания при повышении УОЗ от поздних к оптимальным происходит увеличение среднего индикаторного давления, с другой стороны, увеличение коэффициента избытка воздуха и степени рециркуляции отработавших газов приводит к снижению среднего индикаторного давления. До определенного момента имеется возможность взаимной компенсации этих факторов (при условии обеспечения бездетонационного сгорания).

С увеличением $k_{РОГ}$ средняя относительная скорость сгорания $W_{ср}$ падает, но при этом жесткость рабочего цикла, характеризующая быстротой нарастания давления w_p , существенно не изменяется (рис. 3).

При дальнейшем увеличении $k_{РОГ}$ и коэффициента избытка воздуха удается сохранить удельный индикаторный расход топлива, но происходит падение среднего индикаторного

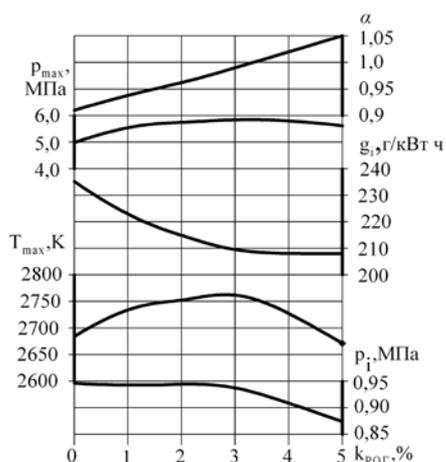


Рисунок 2 — Зависимость коэффициента избытка воздуха, максимального давления цикла, удельного индикаторного расхода топлива, максимальной температуры цикла, среднего индикаторного давления от степени рециркуляции отработавших газов

торного давления p_i , которое невозможно компенсировать углом опережения зажигания. Развитие систем и исполнительных механизмов управления двигателем предполагает совершенствование устройств рециркуляции отработавших газов, в частности клапана.

Клапан РОГ — ответственный элемент системы рециркуляции отработавших газов. С его помощью осуществляется регулирование расхода отработавших газов из

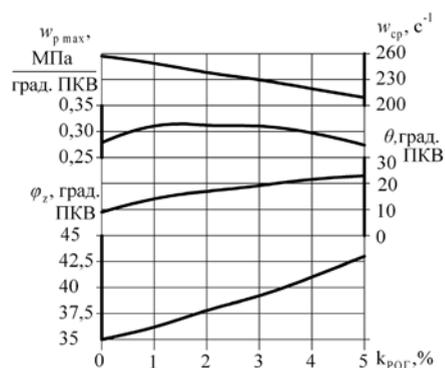


Рисунок 3 — Зависимость средней относительной скорости сгорания, максимальной быстроты изменения давления, угла опережения зажигания θ , продолжительности сгорания φ_z от степени рециркуляции отработавших газов

выпускной системы во впускную. Неточное дозирование отработавших газов в процессе их рециркуляции во впускную систему может привести к существенному ухудшению процесса сгорания и работы двигателя (детонация, пропуски воспламенения и т. п.). Современные образцы систем РОГ имеют достаточно хорошую обратную связь, позволяющую определять и корректировать фактическую концентрацию ОГ в свежем заряде в зависимости от режима работы двигателя. Осуществление обратной связи между рабочими показателями двигателя и положением клапана рециркуляции предполагает использование электрически управляемых устройств, которые имеют высокое быстродействие.

Литература

1. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие. М.: Изд-во РУДН, 1998. 214с., ил.
2. Abd-Alla G.H. Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review // *Energy Conversion and Management*. 2002. № 43. P. 1027 – 1042.
3. Fontana G., Galloni E. Experimental analysis of a spark-ignition engine using exhaust gas recycle at WOT operation // *Applied Energy*. 2010. 87. P. 2187–2193.
4. Cha J., Cho Y., Park J. S. Kwon The Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion Stability, Engine Performance and Exhaust Emissions in a Gasoline Engine // *KSME International Journal*. 2001. № 15 (10). P. 1442 – 1450.

References

1. V.V. Gorbunov, V.N. Patrakhaltsev. *Toksichnost dvigateley vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engine toxicity]: Uchebnoye posobiye*. M.: Izd-vo RUDN, 1998. 214 p., ill.
2. Abd-Alla G.H. Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review // *Energy Conversion and Management*. 2002. № 43. P. 1027 – 1042.
3. Fontana G., Galloni E. Experimental analysis of a spark-ignition engine using exhaust gas recycle at WOT operation // *Applied Energy*. 2010. 87. P. 2187–2193.
4. Cha J., Cho Y., Park J. S. Kwon The Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion Stability, Engine Performance and Exhaust Emissions in a Gasoline Engine // *KSME International Journal*. 2001. № 15 (10). P. 1442 – 1450.

УДК 614.846.6: 621.43.016

Михаил Александрович Савин, кандидат технических наук, доцент, профессор Уральского института ГПС МЧС России (Ури ГПС МЧС России),

ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЯ ЯМЗ-236М2 ПОСЛЕ ОСТАНОВА

Mikhail A. Savin, PhD in Engineering, Assistant Professor, Professor at Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM Russia.

Studying YAMZ-236M2 Diesel Cooldown After Stopping

Аннотация

Приведены результаты исследований охлаждения функциональных систем дизеля ЯМЗ-236М2 после останова в условиях естественной конвекции на спокойном воздухе пожарного депо с различными вариантами его теплоизоляции. Экспериментально установлено, что интенсивнее всего охлаждается моторное масло в поддоне картера. Минимальные темпы охлаждения — у охлаждающей жидкости в блоке цилиндров.

Ключевые слова:

дизель, термостат, радиатор, жалюзи, моторное масло, охлаждающая жидкость, темп охлаждения.

Abstract

The article gives results of studying the cooldown of YaMZ-236M2 diesel functional systems after stopping in conditions of natural convection in the still air of a fire house with various options of its heat insulation. It was deduced from experiments that motor oil undergoes most intense cooldown in the crankcase oil pan. Minimum cooldown rates prevail for the cooling liquids in the cylinder block.

Key words:

Diesel, temperature regulator, radiator, shutters, motor oil, cooling liquid, cooldown rate.

Мониторинг региональных структур Федеральной противопожарной службы МЧС России показал [1], что востребованы, особенно в северных регионах страны, тяжелые пожарные автомобили (ПА) с вместимостью цистерны 5,0 — 10,0 м³, у которых силовым агрегатом является дизельный двигатель (ДВС). Поэтому исследование адаптации дизелей ПА соответствующих мощностей к низкотемпературным условиям эксплуатации весьма актуальны.

Так, в частности, целесообразно изучить процесс охлаждения дизеля пожарного автомобиля после его останова на спокойном воздухе пожарного депо. Это необходимо в случае, когда автомобиль с одного пожара должен следовать на другой. Известно, что силовой агрегат, находясь в «горячем» состоянии, сразу после запуска может развивать номинальную мощность, а следовательно, и максимальную возможную скорость движения пожарного автомобиля. Поэтому для увеличения времени нахождения силового агрегата ПА в «горячем» состоянии необходимо, чтобы темп охлаждения ДВС был минимален, либо нужно осуществить подогрев ДВС тем или иным способом. Все перечисленное предопределяет высокие тяговоскоростные показатели ПА для обеспечения нормативного времени их прибытия к месту вызова [2] и имеет следствием минимизацию количества летальных исходов в результате пожаров и других ЧС. Исходя из изложенного в настоящей работе было решено сосредоточиться на вопросе замедления темпа охлаждения дизеля ЯМЗ-236М2 после его останова в условиях естественной конвекции.

Таким образом, результатом исследования должна стать разработка мер и технических решений, обеспечивающих уменьшение интенсивности теплорассеивания для увеличения времени нахождения двигателя пожарного автомобиля в «горячем» состоянии.

Методика эксперимента

В качестве объекта исследования был выбран V-образный силовой агрегат — дизельный двигатель 6Ч 13/14 марки ЯМЗ-236М2 пожарной автоцистерны АЦП-6/3-40 (5557) (базовое шасси «Урал-5557») с малым износом [3]: приведенный пробег автомобиля составил 4500 км.

Данный силовой агрегат был выбран из следующих соображений:

- дизели Ярославского моторного завода имеют отработанную конструкцию, надежны и просты в эксплуатации [4];
- в пожарные гарнизоны страны, в том числе и северные, поступают пожарные автомобили, изготовленные на шасси автомобиля «Урал», с дизелем ЯМЗ-236М2 и цистерной емкостью до 6000 л. Согласно утвержденной программе экспериментов, было проведено термометрирование функциональных систем ДВС в про-

цессе охлаждения после его останова в условиях естественной конвекции на спокойном воздухе пожарного депо. Температура окружающей среды при этом составляла 291 ± 1 К (18 ± 1 °С).

Рассмотрим установку измерительной аппаратуры и ее тарировку.

В ходе исследований в ДВС измерялась температура охлаждающей жидкости (ОЖ) на выходе из головок вблизи одного из термостатов и в верхнем бачке радиатора, а также температура масла в поддоне картера.

Для измерений температур теплоносителей применялись термометры манометрического типа марки ТКП-60/3М с пределами измерений 273 — 393 К (0 — 120 °С) и классом точности 1,5.

Используемые приборы перед измерениями и после окончания опытов проверялись и тарировались посредством образцового термометра с ценой деления 0,1 К (0,1 °С) в следующих диапазонах температур: водяные — 273 — 393 К (от 0 до +100 °С), для масла — 273 — 353 К (от 0 до +80 °С). Тарировочные графики для регистрации вышеуказанных параметров линейны.

Система охлаждения дизеля была заправлена «мягкой» водой. Термостаты из системы охлаждения не были демонтированы, их исправность проверена до начала экспериментов. Для проверки термостаты были на время сняты с ДВС и опущены в сосуд с водой. По мере нагрева до 363 — 373 К (90 — 100 °С) и последующего охлаждения воды были определены температуры начала и полного открытия их клапанов. У обоих термостатов ТС-107-06 дизеля ЯМЗ-236М2 начало открытия клапанов имело место при температуре 352 К (+79 °С), полное открытие произошло при 359 К (+86 °С). При визуальном осмотре одного из термостатов дизеля установлено неплотное прилегание клапана к седлу: имелся кольцевой зазор шириной 0,1 мм. При диаметре клапана 41 мм площадь такой неплотности составляет 12,75 мм². В то же время внутренний диаметр и площадь поперечного сечения перепускной трубки равны соответственно 18 мм и 254,3 мм².

Таким образом, не весь поток охлаждающей жидкости циркулировал по «малому» кругу циркуляции. Очевидно, что величина расхода охлаждающей жидкости, которая забрасывалась в радиатор системы охлаждения, может быть определена из соотношения площадей кольцевого зазора негерметичного клапана термостата 12,75 мм² и сечения перепускной трубки 254,3 мм². Следовательно, через радиатор постоянно циркулировало примерно 5% общего потока охлаждающей жидкости. Отсюда при подаче насоса системы охлаждения ЯМЗ-236М2 9 л/с при частоте 3850 мин⁻¹ [5] это составило 0,45 л/с, или 27,1 л/мин, что на порядок больше предельно допустимой величины 2,6 л/мин [6].

Общими для всех экспериментов были утеплительный чехол на решетке радиатора, закрытая штатная шторка радиатора. Кроме того, на радиаторе имелся дополнительный экран, согласно патенту РФ [7], в виде трех полос листового материала, поставленных вертикально в ряд в имеющийся зазор между радиатором и кожухом вентилятора. Таким образом, листовой материал полностью перекрывал фронт радиатора, обращенный к вентилятору. Клапаны чехла облицовки радиатора ПА были всегда закрыты.

В отдельных экспериментах имелись следующие отличия в утеплении двигателя или моторного отделения ПА в целом.

Так, в первой серии опытов капот ПА был накрыт сверху чехлом из однослойного шинельного сукна (артикул 4412).

Во второй — шинельным сукном (артикул 4412) в один слой после останова был укрыт сверху собственно ДВС (кроме радиатора СО). Капот чехлом не покрывался.

В третьем испытании двигатель был сверху укрыт двуслойным покрытием, представляющим собой сочетание металлизированной полупульняной ткани, слой из которой располагался ближе к ДВС, и холстопршивного ватина, используемых в комплектах теплозащитной одежды для пожарных [8]. На радиатор было наброшено сверху шинельное сукно в один слой. Капот чехлом не покрывался.

Наконец, в последнем, четвертом, случае ДВС был накрыт также двуслойным покрытием, состоящим из шинельного сукна, и дополнительно сверху — слой холстопршивного ватина. Дополнительно экран радиатора был утеплен шинельным сукном. Капот чехлом не покрывался.

Для экспериментов по определению темпа охлаждения ДВС его сначала прогревали до оптимального теплового режима. Затем, предварительно поставив ПА в помещение пожарного депо, его дизель останавливали, после чего периодически, через каждые 1/4 ч, в течение 270 мин регистрировали температуры функциональных систем силового агрегата.

Результаты экспериментальных исследований динамики охлаждения дизеля ЯМЗ-236М2

Разные условия теплоизоляции оказывают существенное влияние на темп охлаждения функциональных систем дизельного двигателя ЯМЗ-236М2 после его останова в условиях естественной конвекции на спокойном воздухе в гараже (табл. 1 и рис. 1).

При анализе графических материалов было принято в расчет следующее обстоятельство. Согласно американским исследованиям [9] и данным А.П. Смолина [10], нормальная температура смазочного масла должна быть примерно на 50 °С ниже, чем жидкость в системе охлаждения, а нормальная температура охлаждающей жидкости не должна превышать 105 °С. Считается, что именно в таких условиях могут быть получены оптимальные зазоры в сопряжениях движущихся деталей ДВС. Поэтому в качестве репера на графике была принята температура 50 °С.

Анализ полученных данных опытов позволяет сделать ряд выводов.

1. Понижение температур функциональных систем при охлаждении дизеля ЯМЗ-236М2 на спокойном воздухе гаража происходит по экспоненциальному (или близкому к нему) закону.
2. Эквидистантное расположение соответствующих кривых охлаждающей жидкости в блоке и радиаторе подтверждает факт негерметичности одного из термостатов.
3. Интенсивность остывания функциональных систем дизеля различна. Так, из изученных четырех вариантов минимальные темпы охлаждения охлаждающей жидкости в блоке и радиаторе ЯМЗ-236М2 были при элементарном утеплении капота автомобиля «Урал-5557» чехлом из однослойного шинельного сукна (артикул 4412).
4. Самый низкий темп охлаждения моторного масла в поддоне был установлен при четвертом варианте утепления двигателя.
5. Моторное масло в поддоне дизеля ЯМЗ-236М2 после его останова в условиях естественной конвекции на спокойном воздухе пожарного депо охлаждается до температуры +50 °С (323 К) за 70 — 90 мин, а охлаждающая жидкость — более чем за 270 мин. Следовательно, для обеспечения форсированного выхода ЯМЗ-236М2 на номинальную мощность после запуска необходимо в пожарном депо в первую очередь применить технические решения пассивные (теплоизоляция поддона дизеля) или активные (подогрев масла тем или иным способом), не допускающие понижения температуры моторного масла ниже +50 °С (323 К).

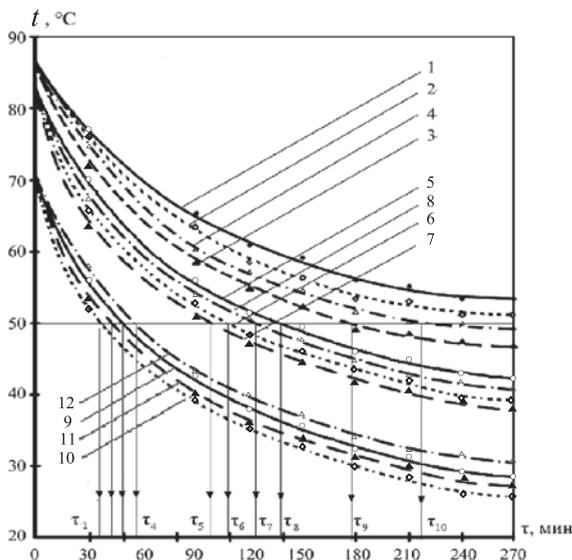


Рисунок 1 — Динамика охлаждения дизеля ЯМЗ-236М2 после его останова в условиях естественной конвекции на спокойном воздухе пожарного депо (температура воздуха +18°C) с различными вариантами его теплоизоляции:

— первый вариант утепления; ······ — второй вариант утепления; - - - - - третий вариант утепления; - · - · - · четвертый вариант утепления.

Линии 1, 2, 3, 4 — температуры ОЖ в рубашке охлаждения (до термостатов); линии 5, 6, 7, 8 — температуры ОЖ радиатора; линии 9, 10, 11, 12 — температуры смазочного масла в поддоне картера

Таблица 1 — Охлаждение функциональных систем дизеля ЯМЗ-236М2 после останова в условиях естественной конвекции (температура воздуха в гараже +18°C)

Теплоносители дизеля ЯМЗ-236М2	Скорость охлаждения, К/мин (°C/мин)			
	Варианты утепления двигателя/силового отделения пожарного автомобиля			
	1	2	3	4
Вода в блоке	0,119	0,129	0,148	0,162
Вода в радиаторе	0,148	0,156	0,161	0,167
Масло в поддоне	0,152	0,163	0,1156	0,144

Литература

1. Яковенко Ю.Ф. Россия: пожарная охрана на рубеже веков. Тверь : Сивер, 2004. 208 с.
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : [федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ : принят Гос. Думой 4 июля 2008 г. : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 г.]. Новосибирск : Сиб. Унив. изд-во, 2008. 144 с.
3. Наставление по технической службе ГПС МВД России : приказ МВД России от 24.01.1996 г. № 34.
4. Желтяков В.Т. Дизели и силовые агрегаты ЯМЗ // Автомобильная промышленность. 2001. № 12. С. 9 — 11.
5. Сабинин А.А. Автомобили с дизельными двигателями. М. : Высшая школа, 1970. 224 с.
6. Кригер А.М., Дискин М.Е. и др. Жидкостное охлаждение автомобильных двигателей. М. : Машиностроение, 1985. 176 с.
7. Пат. 2078954 Российская Федерация, МКИ F 01 P 7/10, 7/02. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / Савин М.А. (Россия). № 94017181; заявл. 26.04.94; опубл. 10.05.97. Бюл. № 13.
8. Простов Н.И., Аверин Ю.Ф., Логинов В.И. Техническое описание и инструкция по эксплуатации комплекта теплозащитной одежды для пожарных ТК-800. М. : ВНИИПО МВД СССР, 1987. С. 3, 6, 7.
9. SAE Preprints, 1960, № 251 C; 1961, № 392; 1962, № 448 A, 448 D; 1963, 656 A, 660 A, 660 B; 1965, № 939 A.
10. Смолин А.П. Эксплуатация строительных машин в зимних условиях. М. : Стройиздат. 1968. 188 с.

References

1. Yu.F. Yakovenko. Rossiya: pozharnaya okhrana na rubezhe vekov [Russia: fire protection at the turn of the century]. Tver: Siver, 2004. 208 p.
2. Tekhnichesky reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti: [Technical regulations on fire safety requirements]. Federalny zakon ot 22 iulya 2008g. № 123-FZ. Prinyat Gos. Dumoy 04.07. 2008 g. Odobren Sovetom Federatsii 11.07.2008 g. Novosibirsk: Sib. Univ. Izd-vo. 2008. 144 p.
3. Nastavleniye po tekhnicheskoy sluzhbe GPS MVD Rossii [Instruction concerning the technical service of State Fire Service of EMERCOM Russia]. Priказ MVD Rossii ot 24.01.1996 g. № 34.
4. V.T. Zheltyakov. Dizeli i silovye agregaty YaMZ [YaMZ diesels and power plants] // Avtomobilnaya promyshlennost. 2001. № 12. P. 9-11.
5. A.A. Sabinin. Avtomobili s dizelnymi dvigatelyami [Diesel engine cars]. M.: Vysshaya shkola, 1970. 224 p.
6. A.M. Kriger, M.E. Diskin et al. Zhidkostnoye okhlazhdeniye avtomobilnykh dvigateley [Automotive engine liquid cooling]. M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 176 p.
7. Patent 2078954 RF, IPC F 01 P 7/10, 7/02 Sistema okhlazhdeniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engine cooling system] / M.A. Savin. (Russia). No. 94017181; Applied on 26.04.94; Publ. on 10.05.1997. Bull. № 13.
8. N.I. Prostov, Yu.F. Averin, V.I. Loginov. Tekhnicheskoye opisaniye i instruksiya po ekspluatatsii komplekta teplozaschitnoy odezhdy dlya pozharnykh TK-800 [Technical description and operation manual for TK-800 fireman heat-protective clothing set]. M.: VNIIPPO MVD SSSR, 1987. P. 3; 6; 7.
9. SAE Preprints, 1960, № 251 C; 1961, № 392; 1962, № 448 A, 448 D; 1963, 656 A, 660 A, 660 B; 1965, № 939 A.
10. A.P. Smolin. Ekspluatatsiya stroitelnykh mashin v zimnikh usloviyakh [Construction machinery operation in winter]. M.: Stroyizdat. 1968. 188 p.

УДК 614.846.6: 621.43.016

Юрий Дмитриевич Силуков, доктор технических наук, профессор кафедры транспорта и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ), Екатеринбург, заслуженный деятель науки и техники России, почетный дорожник РФ

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Yuri D. Silukov, DSc in Engineering, Professor at Transport and Road Building Chair of Ural State Forest Engineering University. Honoured Worker of Science and Technology of Russia, Honoured Road Builder of RF.

Comparison Of Different Options For Road Design

Аннотация

Сравнение вариантов при проектировании автомобильной дороги представляет трудоемкую операцию. Для упрощения расчетов предлагается метод вычислений не по всем элементам продольного профиля, а только по трем эквивалентным элементам.

Ключевые слова: автомобильная дорога, вариант, проектирование, эквивалентный продольный профиль.

Abstract

Comparison of different options for the design of the road is time-consuming operation. In order to simplify the calculations, a simple method is proposed which does not perform calculations on all elements of the longitudinal profile but only uses three equivalent elements.

Ключевые слова: highway, option, design, equivalent longitudinal profile

Сравнение различных вариантов при проектировании автомобильной дороги представляет довольно трудоемкую операцию и занимает продолжительное время.

С целью выбора наиболее выгодного варианта приходится оценивать показатели дороги на всем протяжении, а не только на отдельных участках. В этом случае необходимо считать значения сравниваемых параметров на всех элементах продольного профиля, а затем полученные результаты суммировать. Это трудоемкая операция.

Предлагается более простой метод сравнения расчетов — не по всем элементам продольного профиля, а только по трем эквивалентным элементам.

Сущность предлагаемого метода заключается в том, что все существующие подъемы на продольном профиле (в одном направлении) заменяются одним эквивалентным подъемом, все спуски — одним эквивалентным спуском, а длины всех площадок суммируются.

Эквивалентный подъем $i_{\text{экр.п}}$ находится из следующего равенства:

$$i_{\text{экр.п}} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}, \quad (1)$$

где $h_1, h_2, h_3 \dots h_n$ — величины превышений каждого подъема на продольном профиле дороги;

$l_1, l_2, l_3 \dots l_n$ — длины каждого подъема на дороге.

Вести расчет эквивалентного подъема $i_{\text{экр.п}}$ по равенству (1) неудобно, так как нужно измерять на дороге или вычислять по продольному профилю превышение каждого подъема.

С целью упрощения расчетов предлагается в формулу (1) подставить вместо h его значение

$$h = i \cdot l, \quad (2)$$

где i — величина подъема элемента продольного профиля.

С учетом равенства (2) формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$i_{\text{экр.п}} = \frac{i_1 \cdot l_1 + i_2 \cdot l_2 + i_3 \cdot l_3 + \dots + i_n \cdot l_n}{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}, \quad (3)$$

где $i_1, i_2, i_3 \dots i_n$ — величины уклонов на каждом подъеме продольного профиля дороги;

$l_1, l_2, l_3 \dots l_n$ — длины каждого подъема.

В виде примера на рис. 1 показан участок продольного профиля дороги с указанием в числителе величин уклонов в ‰, а в знаменателе — их длина в метрах.



Рисунок 1 — Участок продольного профиля с указанием величин уклонов и их длины

Если принять направление движения автомобилей по указанной стрелке (см. рис. 1), то величина эквивалентного подъема $i_{\text{экр.п}}$ будет равна

$$i_{\text{экр.п}} = \frac{30 \cdot 100 + 15 \cdot 100}{100 + 100} = 22\%.$$

Величина эквивалентного спуска

$$i_{\text{экв.п}} = \frac{17 \cdot 200 + 23 \cdot 80}{200 + 80} = 19\%.$$

Таким образом, большое количество подъемов и спусков на продольном профиле дороги заменено двумя значениями: одним эквивалентным подъемом и одним эквивалентным спуском. По этим двум значениям и длине площадок дороги можно определить для сравниваемых дорог интересующие нас параметры. Например, эквивалентную касательную силу тяги, эквивалентную механическую работу, время хода по дороге, удельную энергию автомобилей, расход горючего, величину токсичных выбросов и др.

Выполним расчет эквивалентной касательной силы тяги автомобиля по формуле

$$F_{\text{экв.п}} = G(f_0 + i_{\text{экв.п}} + \omega_{\text{в}}) \quad (4)$$

где $F_{\text{экв.п}}$ — эквивалентная касательная сила тяги, Н;

G — вес автомобиля, Н;

f_0 — коэффициент сопротивления качению (характеризует тип и состояние дорожного покрытия, для асфальтобетона f_0 составляет 0,015 — 0,020, для гравийной дороги f_0 будет 0,040 — 0,045);

$i_{\text{экв.п}}$ — эквивалентный подъем, десятичная дробь (+ на подъеме, — на спуске);

$\omega_{\text{в}}$ — коэффициент сопротивления воздушной среды,

$$\omega_{\text{в}} = \frac{k \cdot S \cdot V^2 \cdot g}{G}, \quad (5)$$

где k — коэффициент обтекаемости (для грузовых автомобилей 0,06 — 0,07, легковых 0,020 — 0,035, автобусов 0,025 — 0,040);

S — лобовая площадь автомобиля, м² (для легковых 1,5 — 2,8, грузовых 3 — 5, автобусов 4,5 — 6,5);

V — скорость движения, м/с;

G — вес автомобиля, Н;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести.

При расчете касательной силы тяги по формуле (4) на площадках продольного профиля проектируемой дороги величины эквивалентного подъема или эквивалентного спуска будут равны нулю.

Сравнивая величины полученных эквивалентных касательных сил тяги на различных вариантах проектируемой дороги, можно установить, на каком направлении сила тяги будет меньше. Следовательно, какому варианту проектируемой дороги следует отдать предпочтение и где можно сэкономить расход горючего и иметь меньшие токсичные выбросы от транспорта.

Рассчитав $F_{\text{экв.п}}$, можно определить эквивалентную механическую работу транспорта на эквивалентном подъеме

$$A_{\text{экв}} = F_{\text{экв.п}} \cdot l_{\text{п}} \quad (6)$$

где $A_{\text{экв}}$ — эквивалентная механическая работа автомобилей на эквивалентном подъеме, Н·м;

$l_{\text{п}}$ — длина всех подъемов на дороге в одном направлении, м.

Аналогично определяем эквивалентную касательную силу тяги и эквивалентную механическую работу для встречного движения транспорта, когда подъемы становятся спусками, а спуски подъемами, длина площадок остается постоянной.

Выполненные примеры расчетов по эквивалентному продольному профилю дороги показывают, что при проектировании нескольких вариантов дороги можно довольно просто выбрать наиболее оптимальный вариант.

УДК 656.259.9

Сергей Валентинович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения, проректор по научной работе и международным связям Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Антон Николаевич Попов, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СИГНАЛОВ ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Sergey V. Bushuev, PhD in Engineering, Associate Professor at the chair 'Automation, signaling and communication on railway transport' of the Ural State University of Railway Transport, Vice-Rector of Scientific Work and International Affairs of the Ural State University of Railway Transport (USURT).

Anton N. Popov, post-graduate student of the chair 'Automation, signaling and communication on railway transport' of the Ural State University of Railway Transport.

Measurement Precision And Repeatability Control Of Audio Frequency Track Circuit Signals

Аннотация

Ряд преимуществ тональных рельсовых цепей обусловил их широкое внедрение на железнодорожном транспорте. Принцип действия таких рельсовых цепей основан на сигналах сложной формы. Существующие измерители систем технической диагностики и переносные измерительные приборы не обеспечивают сходимость и воспроизводимости результатов измерений сигналов тональных рельсовых цепей.

В статье исследована форма сигналов в разных точках тональной рельсовой цепи. Рассмотрено влияние формы сигналов на точность, сходимость и воспроизводимость измерений.

Ключевые слова: тональная рельсовая цепь, системы технической диагностики и мониторинга, среднеквадратическое значение, качество измерений, амплитудно-модулированные сигналы, перемодуляция.

Abstract

The number of advantages of audio frequency track circuits stipulates their wide implementation on railway transport. The functional principle of such track circuits is based on complex waves. The existing meters of technical diagnostics systems and portable meters don't assure precision and repeatability of measurement results of audio frequency track circuit signals.

In the article the signals form in various points of audio frequency track circuit has been investigated. It has been also examined the influence of signals form on measurement accuracy, precision and repeatability.

Key words: audio frequency track circuit, technical diagnostics and monitoring systems, root-mean-square value, measurement quality, amplitude-modulated signals, overmodulation.

Рельсовая цепь — один из основных элементов систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). От надежной работы рельсовых цепей зависит безопасность движения.

На сегодняшний день благодаря ряду преимуществ все большее распространение находят тональные рельсовые цепи (ТРЦ). Использование частот тонального диапазона позволяет существенно повысить помехозащищенность и ослабить взаимные влияния соседних рельсовых цепей, централизованно размещать аппаратуру рельсовых цепей, в несколько раз снизить потребляемую мощность и исключить изолирующие стыки. Однако, как и все типы рельсовых цепей, ТРЦ требуют выполнения правильной регулировки, периодических измерений параметров и контроля своего состояния согласно технологическим картам для обеспечения необходимой надежности и безопасной работы.

Для контроля текущего состояния, настройки и регулировки ТРЦ в настоящее время применяется ряд приборов разных производителей. Кроме того, переход к техническому обслуживанию по состоянию требует активной разработки и внедрения систем технической диагностики и мониторинга (СТДМ), позволяющих отслеживать динамику изменения контролируемых параметров. Поэтому очень важно для создания эффективной системы обслуживания ТРЦ использовать измерительные приборы, показания которых обладают свойствами сходимости и воспроизводимости с измерительными средствами систем диагностики, что в настоящее время не всегда выполняется.

С другой стороны, важной характеристикой для систем диагностики является длительность цикла измерений всех объектов на станции, но при эксплуатации уменьшение времени



измерения каждого объекта снижает точность, поэтому следует говорить не только о точности, но и о качестве измерений вообще. Под качеством измерений понимают совокупность свойств, обеспечивающих получение в установленный срок результатов измерений с требуемой точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью [1].

К сожалению, особенно для ТРЦ вопросы скорости измерений практически не рассматриваются, а вопросы сходимости и воспроизводимости находятся на начальном этапе изучения. Из редких публикаций [2 — 4] следует, что результаты, полученные применяемыми для измерений в ТРЦ приборами разных типов и даже разными приборами одного типа, в зависимости от точки включения прибора в рельсовую цепь, различаются на 10 — 40%. Это говорит о низкой сходимости и воспроизводимости таких измерений. Причинами значительного расхождения показаний авторы считают разное входное сопротивление приборов [5], сложную форму самих сигналов ТРЦ и операции цифровой обработки сигналов.

Исследуем, как влияет форма сигнала ТРЦ на разброс показаний приборов. Сигналы ТРЦ характеризуются среднеквадратическим значением (СКЗ). Среднеквадратическое значение за интервал времени τ [6] равно

$$U = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} u^2(t) dt}. \quad (1)$$

СКЗ, мера способности электрического сигнала выделять теплоту, определяется как площадь под кривой сигнала, усредненная на интервале времени τ . При $\tau = \infty$ получается истинное СКЗ. Если сигнал периодический, то средняя площадь каждого периода — величина постоянная и равна средней площади любого числа периодов, т. е. для периодических сигналов истинное СКЗ может быть получено при $\tau = kT$, где T — период сигнала $u(t)$, k — натуральное число.

Если при измерении СКЗ периодических сигналов $\tau \neq kT$ (рис. 1), то полученное значение будет отличаться от истинного. Появится методическая погрешность [7 — 8]. Причем величина погрешности будет определяться формой сигнала, длительностью интервала измерений τ , а также фазой сигнала в момент начала измерений. Таким образом, рассматриваемая методическая погрешность определяется не только характеристиками средств измерений, но и свойствами самого сигнала.

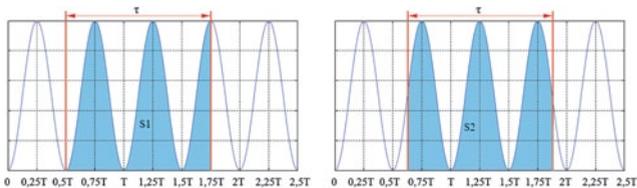


Рисунок 1 — Измерение СКЗ при $\tau \neq kT$

Оценим методическую погрешность в процентах отклонения от истинного СКЗ U' по выражению

$$E = \left(\frac{U}{U'} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

и определим, в какой области может изменяться погрешность, обусловленная рассмотренным эффектом при измерениях в ТРЦ.

Рассмотрим сигналы ТРЦ в разных точках рельсовой цепи: на входе путевого приемника (рис. 2), выходе путевого генератора (рис. 3) и выходе путевого фильтра (рис. 4) и их спектры, чтобы выяснить, как форма сигналов влияет на результат измерения.

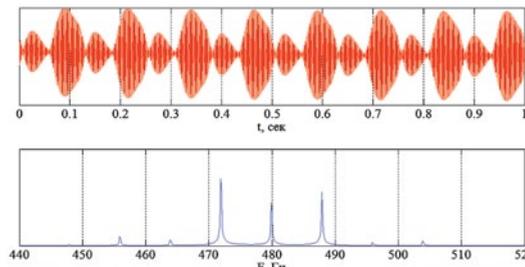


Рисунок 2 — Сигнал на входе путевого приемника ТРЦ и его спектр

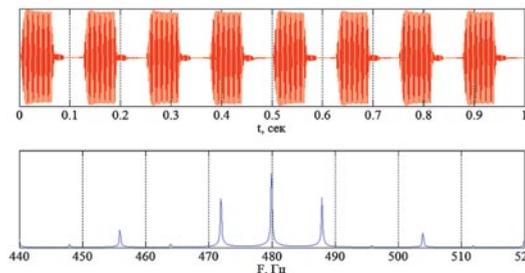


Рисунок 3 — Сигнал на выходе путевого генератора ТРЦ и его спектр

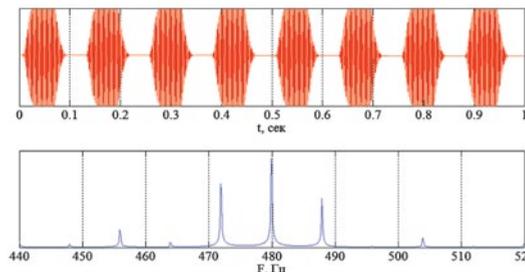


Рисунок 4 — Сигнал на выходе путевого фильтра ТРЦ и его спектр

Вид спектров показывает, что эти сигналы можно рассматривать как однотоновые амплитудно-модулированные (ОАМ) сигналы с перемодуляцией (коэффициентом модуляции больше 1). Такой сигнал состоит из несущего и модулирующего колебаний, а замена реальных сигналов ТРЦ на ОАМ позволит исследовать влияние интервала измерений, формы и начальной фазы сигнала на точность измерений.

Аналитическое выражение для ОАМ сигнала записывается следующим образом [9]:

$$S(t) = U_m [1 + M \sin(2\pi F_M t + \varphi_M)] \sin(2\pi F_H t + \varphi_H), \quad (3)$$

где M — коэффициент модуляции.

Вычисление (1) после подстановки в него (3) дает сложное выражение, практическое использование которого затруднительно. ОАМ-сигнал состоит из двух синусоидальных составляющих с разными частотами, причем частота модуляции значительно ниже несущей частоты. Погрешность измерения СКЗ

синусоидального сигнала затухает с увеличением интервала измерения и имеет нулевые значения, если в интервал измерения помещается целое число полупериодов [7]. Поэтому можно предположить, что несущая частота оказывает меньшее влияние на погрешность, чем частота модуляции при измерении сигнала ТРЦ. Так как сигнал ТРЦ не имеет симметрии относительно полупериода, в отличие от синусоидального сигнала, то, чтобы избавиться от влияния модулирующей частоты, следует рассматривать влияние несущей на периоде частоты модуляции.

Рассмотрим, как влияет методическая погрешность от несущего колебания на одном периоде сигнала ТРЦ на результат измерений. Несущее колебание сигнала ТРЦ представляет собой синусоиду с частотами для ТРЦЗ 420, 480, 580, 720 или 780 Гц, а для ТРЦ4 4545, 5000 или 5555 Гц. Наибольшая методическая погрешность для синусоидального сигнала может быть определена по выражениям [7]:

$$E = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{2\pi F_c \tau}} - 1 \right) \cdot 100\%; \quad (4)$$

$$E = \left(\sqrt{1 - \frac{1}{2\pi F_c \tau}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Для всех возможных комбинаций частот сигналов ТРЦ вычислим по выражениям (4), (5) наибольшие значения погрешности измерений несущего колебания на одном периоде сигнала ТРЦ (табл. 1).

Таблица 1 — Погрешность измерений несущего колебания на одном периоде сигнала ТРЦ

Частота модуляции, Гц	Несущая частота, Гц	Количество периодов несущей частоты в периоде сигнала ТРЦ	Наибольшая погрешность измерения несущей частоты за один период сигнала ТРЦ, %
8	420	52,5	0,15
	480	60	0,13
	580	72,5	0,11
	720	92	0,09
	780	97,5	0,08
	4545	568,1	0,01
	5000	625	0,01
5555	694,4	0,01	
12	420	35	0,23
	480	40	0,2
	580	48,33	0,17
	720	60	0,13
	780	65	0,12
	4545	378,8	0,02
	5000	416,7	0,02
5555	462,9	0,02	

В наихудшем случае — при комбинации частот 420/12 — погрешность не превысит 0,23%. Следует отметить, что наибольшее значение погрешности затухает с ростом интервала измерения (рис. 5).

Поэтому увеличение интервала измерения более одного периода сигнала ТРЦ приведет к еще большему снижению погрешности. Таким образом, влиянием несущего колебания на погрешность измерения сигнала ТРЦ можно пренебречь и рассматривать только влияние огибающей.

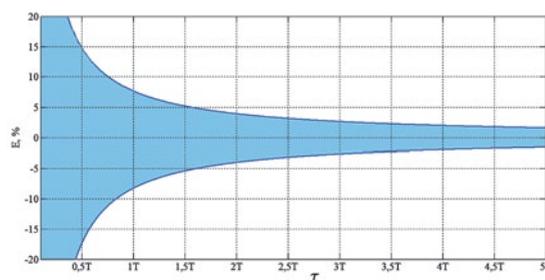


Рисунок 5 — Область значений погрешности для синусоидального сигнала

Рассмотрим зависимость величины методической погрешности измерения сигнала ТРЦ от формы огибающей. При амплитудной модуляции связь между огибающей и модулирующим сигналом $s(t) = \sin(2\pi F_M t + \varphi_M)$ определяется следующим образом:

$$S(t) = U_m [1 + M \sin(2\pi F_M t + \varphi_M)]. \quad (6)$$

В соответствии с (1) получим выражение для определения СКЗ огибающей сигнала ТРЦ

$$U = U_m \sqrt{\frac{M^2 + 2}{2} + 2M \frac{\cos(\frac{\psi}{2}) - \cos(2\pi F \tau + \frac{\psi}{2})}{\pi F \tau} + \frac{M^2 \sin(\psi) - \sin(4\pi F \tau + \psi)}{4\pi F \tau}}. \quad (7)$$

где $\psi = 4\pi F_M t_0 + 2\varphi_M$ — величина, зависящая от момента начала измерения.

Для оценки методической погрешности измерения огибающей сигнала ТРЦ по выражению (2) требуется знать истинное СКЗ огибающей. Получим его, устремив к бесконечности в (7) интервал измерения τ , и подставим полученное значение в (2)

$$E = \left(\sqrt{1 + \frac{4M \cos(\frac{\psi}{2}) - \cos(2\pi F \tau + \frac{\psi}{2})}{2 + M^2} + \frac{M^2 \sin(\psi) - \sin(4\pi F \tau + \psi)}{2 + M^2} - 1} \right) 100\%. \quad (8)$$

Если интервал измерения не синхронизирован с сигналом (ψ — случайная величина), то для получения точных границ области методической погрешности можно определить максимальные и минимальные значения, которые могут принимать функции $K_1 = \cos(\psi/2) - \cos(2\pi F \tau + \psi/2)$ и $K_2 = \sin(\psi) - \sin(4\pi F \tau + \psi)$ при одинаковых значениях аргументов. Можно также определить с заданной вероятностью значения K_1 и K_2 путем статистических исследований реальных сигналов ТРЦ.

Первый способ не учитывает отличий ОАМ-модели от реальных сигналов ТРЦ, которые имеют в своем спектральном составе дополнительные гармонические составляющие (см. рис. 2 — 4). Поэтому погрешность реальных сигналов может выходить за полученные границы.

Второй способ обладает большей трудоемкостью, хотя позволяет получить наиболее точные результаты.

Возможно также заменить каждую тригонометрическую функцию в (8) ее областью определения. При одинаковых значениях аргументов области определения функции в (8)

будут несколько хуже, но это обеспечит запас для учета отличий между ОАМ-моделью и сигналами ТРЦ, а также упростит расчетное выражение. В дальнейшем предлагаемая модель может быть уточнена.

Заменим в (8) тригонометрические функции областью их определения и получим:

$$E_{\max} = \left(\sqrt{1 + \frac{M(8+M)}{2\pi F\tau(2+M^2)}} - 1 \right) 100; \quad (9)$$

$$E_{\min} = \left(\sqrt{1 - \frac{M(8+M)}{2\pi F\tau(2+M^2)}} - 1 \right) 100. \quad (10)$$

Коэффициенты модуляции сигналов ТРЦ находятся в пределах от 1 до 4, что видно по их спектральному представлению (см. рис. 2 — 4). Для указанной области построим зависимость погрешности от коэффициента модуляции для двух значений интервала измерения $\tau = 1,5$ периода огибающей и $\tau = 1,75$ периода огибающей (рис. 6).

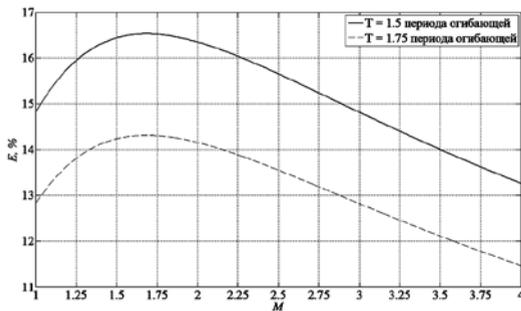


Рисунок 6 — Зависимость погрешности от коэффициента модуляции

Оба графика показывают, что максимум погрешности наблюдается при значении коэффициента модуляции, примерно равном 1,7. Используем именно это значение, чтобы получить границы области погрешности для сигналов ТРЦ (рис. 7).

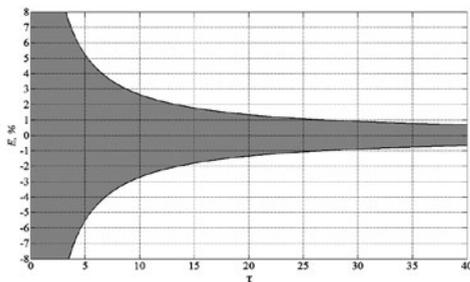


Рисунок 7 — Область погрешности для сигнала ТРЦ

Необходимый интервал измерений для обеспечения заданной величины погрешности определяется по выражению

$$\tau = \frac{M(M+8)}{2\pi F(E_3^2 + 2E_3)(M^2 + 2)}. \quad (11)$$

Границы области погрешности достигают значений менее 2% при интервале измерения более 13 периодов сигнала ТРЦ (1,1 с — для частоты модуляции 12 Гц или 1,66 с — для частоты модуляции 8 Гц) и менее 1% при интервале измерения более 28 периодов (2,4 с — для частоты модуляции 12 Гц или 3,5 с — для частоты модуляции 8 Гц). Кроме того, измеритель должен обеспечивать значение погрешности измерений для обеих частот модуляции, т. е. следует выбирать наибольший интервал измерения. Применение такого способа для выбора параметров измерителей сигналов ТРЦ весьма ограничено — полученный измеритель будет обладать недостаточным быстродействием.

Рассмотрим возможности увеличения быстродействия измерителей без потери точности измерений. Графиком функции погрешности измерений (8) является поверхность, зависящая от двух переменных: фазы в момент начала измерений и интервала измерений. Полагая, что влиять на фазу измеряемого сигнала мы не можем, интерес будет представлять проекция полученной зависимости в плоскости $(E; \tau)$, приведенная для значения коэффициента модуляции $M = 1,7$ (рис. 8).

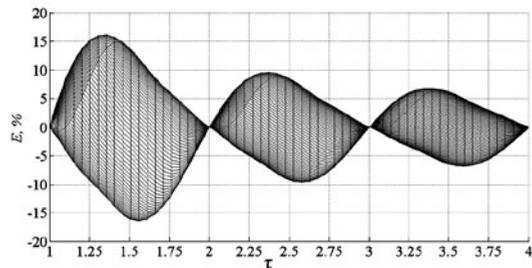


Рисунок 8 — Зависимость погрешности от интервала измерения для сигналов ТРЦ

Погрешность может принимать любые значения из заштрихованной области, в зависимости от фазы сигнала в момент начала измерения при заданном интервале измерения.

Точки, в которых погрешность равна нулю, соответствуют случаю, когда в интервал измерения помещается целое число периодов сигнала.

Для синтеза подходящего измерителя необходимо использовать интервалы измерения, на которых помещается целое число периодов сигналов ТРЦ с частотами модуляции 8 Гц и 12 Гц одновременно. Такими интервалами измерений для сигналов ТРЦ являются 0,25 с; 0,5 с; 0,75 с; 1 с; 1,25 с; 1,5 с; 1,75 с; 2 с; 2,25 с; 2,5 с; 2,75 с; 3 с и т. д. Чем меньше значение интервала измерения, тем большей величины может достигать погрешность (см. рис. 7) при отклонении от номинальных значений и расчетных параметров (частота модуляции сигналов ТРЦ, величина постоянной времени для аналоговых приборов, частота дискретизации и разрядность АЦП для цифровых средств измерений). Точное значение погрешности при этом может быть получено с помощью моделирования.

На основе предложенной модели можно также сформулировать требования к допустимому отклонению интервала измерения от периода модуляции для обеспечения требуемой точности измерений (рис. 9).

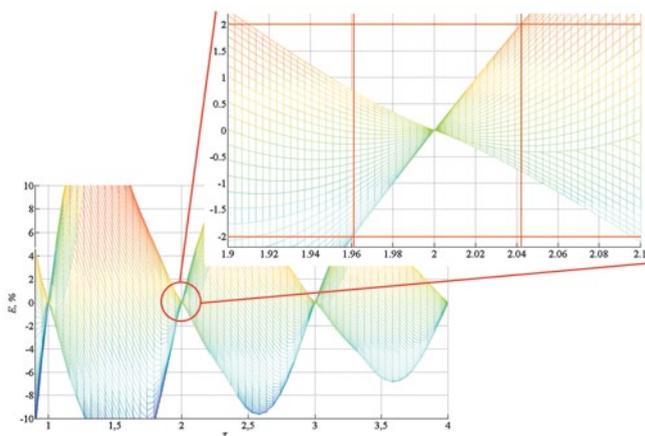


Рисунок 9 — Отклонение интервала измерения
 Например, для обеспечения погрешности не более 2% время измерения для ТРЦ может отклоняться от 0,25 с (2 периода частоты 8 Гц) на 0,005 с, от 0,5 с (4 периода частоты 8 Гц) на 0,01 с. Отклонение временных параметров не должно превышать 2%.

Таким образом, можно существенно повысить быстродействие средств измерений сигналов ТРЦ с 1,66 до 0,25 с (более 6 раз) для величины погрешности 2% при условии, что отклонение интервала измерения не превысит 2%. Такие требования

могут быть легко реализованы в цифровых средствах измерений.

Корректировка интервала измерения существующих цифровых приборов позволит обеспечить сходимость и воспроизводимость результатов измерений сигналов ТРЦ при существенном повышении быстродействия.

В измерителях на основе TRUE-RMS-преобразователей интервал измерения задается с помощью усредняющего конденсатора. Сигнал ТРЦ является низкочастотным, поэтому требуется конденсатор большой емкости, но такие конденсаторы обладают низкой точностью (10 — 20%). Из-за этого в приборах на TRUE-RMS-преобразователях невозможно обеспечить отклонение интервала измерения менее 2% и, как следствие, невозможно обеспечить высокую точность при высоком быстродействии измерителя.

Кроме того, интервал измерения прибора на основе TRUE-RMS-преобразователя с усредняющим конденсатором большой емкости может измениться, например, из-за снижения емкости конденсатора. Поэтому обеспечить высокое быстродействие аналоговых приборов для данного типа сигналов с использованием предложенного метода практически нецелесообразно. Реально обеспечить точность можно только выбором увеличенного интервала измерений, который скомпенсирует низкую точность конденсатора (например, для обеспечения точности измерений 2% требуется интервал измерений сигналов ТРЦ около 2 с).

Литература

1. Сергеев А.Г. *Метрология* : учебник. М. : Логос, 2005. 272 с.
2. Мартычук П.П. Измерения в рельсовых цепях тональной частоты // *Автоматика, связь, информатика*. 2004. № 12. С. 16.
3. Молодцов А.Н. Измерения напряжения и силы тока цифровым мультиметром В7-63 // *Автоматика, связь, информатика*. 2003. № 9. С. 39 — 41.
4. Федорчук А.Е. Функциональное развитие системы АДК-СЦБ // *Автоматика, связь, информатика*. 2005. № 12. С. 42 — 45.
5. Сепетый А.А., Кольцов В.В., Прищеп В.С. и др. Измерительно-вычислительные средства в системе автоматизации диагностирования и контроля устройств СЦБ : учебник для вузов. Ростов-на-Дону : Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2009. 416 с.
6. Попов В.С., Желбаков И.Н. Измерение среднеквадратического значения напряжения. М. : Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
7. Бушуев С.В., Попов А.Н. Исследование точности измерений среднеквадратических значений электрических сигналов на ограниченных интервалах времени // *Транспорт Урала*. 2011. № 2 (29). С. 46 — 50.
8. Бушуев С.В., Попов А.Н. Проблемы точности измерений среднеквадратических значений сигналов в устройствах автоматики и телемеханики // *Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура* : матер. науч.-техн. конф., посв. 55-летию УрГУПС : в 2 т. / УрГУПС. Т. 1. Екатеринбург, 2011. С. 745 — 752.

References

1. Sergeev A.G. *Metrologija*: uchebnik. [Metrology: courstsebook] M.: Logos, 2005. 272 s. ISBN 5-94010-374-X.
2. Martynchuk P.P., *Izmerenija v relsovykh tsepjakh tonalnoj chastoty* [Measurements in audio frequency track circuits] // *Avtomatika, svjaz, informatika*. 2004. №12. S.16. ISSN 0005-2329.
3. Fedorchuk, A.E. *Funksionalnoe razvitie sistemy ADK-STsB* [Functional development of ADK- signaling arrangement system] // *Avtomatika, svjaz, informatika*. 2005. №12. S. 42 – 45. ISSN 0005-2329.
4. Sepetyj A. A., Koltsov V. V., Priwepa V. S. i dr. *Izmeritelno-vychislitelnye sredstva v sisteme avtomatizatsii diagnostirovanija i kontrolja ustrojstv STsB: ucheb. dlja vuzov*. [Instrumentation and computer tools in the system of diagnostics automation and control of signaling arrangement: coursebook for Universities] Rostov-na-Donu: Rost. gos. un-t putej soobshchenija. 2009. 416 s. ISBN 978-5-88814-214-1.
5. Molodtsov A.N., *Izmerenija naprjazhenija i sily toka tsifrovym multimetrom V7-63* [Voltage and current intensity measurement by digital multimeter V7-63] // *Avtomatika, svjaz, informatika*. 2003. №9. S.39 – 41. ISSN 0005-2329.
6. Popov V.S., Zhelbakov I.N. *Izmerenie srednekvadrateskogo znachenija naprjazhenija*. [Measurement of root-mean-square voltage] M.: Energoatomizdat, 1987. 120 s.
7. Bushuev S.V., Popov A.N. *Issledovanie tjchnosti izmerenij srednekvadrateskih znachenij elektricheskikh signalov na ogranichennyh intervalah vremeni* [Investigation of electrical signals RMS values measurements accuracy in limited time intervals] // *Transport Urala*. 2011. # 2 (29). s. 46 — 50.
8. Bushuev S.V., Popov A.N. *Problemy tochnosti izmerenij srednekvadrateskih znachenij signalov v ustrojstvah avtomatiki i telemehaniki* [Problems of signals RMS values measurements accuracy in automation and remote control] // *Transport XXI veka: issledovanija, innovacii, infrastruktura* : mater. nauch.-tehn. konf., posv. 55-letiju UrGUPS : v 2 t. / UrGUPS. T. 1. Ekaterinburg, 2011. S. 745 — 752.

УДК 004

Виктор Михайлович Алексеев, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроники и защиты информации» Московского государственного университета путей сообщения (МГУПС), Москва,
Владислав Викторович Алексеев, аспирант кафедры «Автоматизированные системы управления» Московского государственного университета путей сообщения (МГУПС), Москва

МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕРВИСОВ В ИТ-СИСТЕМЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА¹

Viktor M. Alekseyev, DSc in Engineering, Professor; Electronics and Information Security Chair of Moscow State University of Railway Transport; Moscow, Russia,
Vladislav V. Alekseyev, postgraduate student; Automated Control Systems Chair of Moscow State University of Railway Transport

Model Of Service Information Interaction In High-Speed Transport IT-System¹

Аннотация

Рассматриваются вопросы построения информационных структур для высокоскоростных транспортных систем. Проводится выбор и сравнение протоколов обмена между информационными системами и объектными контроллерами с учетом требований по защищенности соединений и использованию современных подходов к построению телекоммуникационных распределенных структур. Рассмотрены модели классификации трафика в соответствии с требованиями приоритетности передаваемой информации. Определены протоколы взаимодействия приложений в ИТ-системе высокоскоростного транспорта.

Ключевые слова: пакет, приоритезация, телекоммуникации, алгоритм, высокоскоростной транспорт, информационные системы.

Abstract

The article considers issues of building information structures for high-speed transport systems. Exchange protocols between information systems and object controllers are selected and compared with account of requirements to connection security and using contemporary approaches to building of distributed telecommunication structures. The paper deals with traffic classification models pursuant to the requirements of transmitted information priority. Protocols of application interaction in the high-speed transport IT-system are determined.

Ключевые слова: packet, prioritizing, telecommunications, algorithm, high-speed transport, information systems.

¹ Статья выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного контракта № 07514114095 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы»

Высокоскоростной транспорт (ВСТ) нуждается не только в применении высокоскоростных технологий передачи информации, но и в создании новых технологий в сфере ИТ, отвечающих требованиям к защите информации, целостности, скорости и гарантированному времени доставки информации. Во многом поставленным требованиям отвечают технологии ИТ, базирующиеся на оптической аппаратуре, использующей технологии DWDM. Вместе с тем необходимо отметить, что для реализации большинства задач, стоящих перед ВСТ, необходим учет признаков приоритетности передаваемой информации в пакетах. Увеличение объемов передаваемой информации и потребности в реализации передачи мультимедийных потоков заставляют использовать протоколы, нацеленные на передачу разнородного трафика и обеспечивающие достаточно высокие показатели по защищенности передаваемой информации.

Структура локальных вычислительных сетей (ЛВС). Рассмотрим структуру реализации ЛВС и выхода в корпоративную или внешнюю сеть. Сеть состоит из маршрутизатора, коммутатора третьего уровня L3, коммутатора второго уровня L2, защитного экрана и сервера (рис. 1).

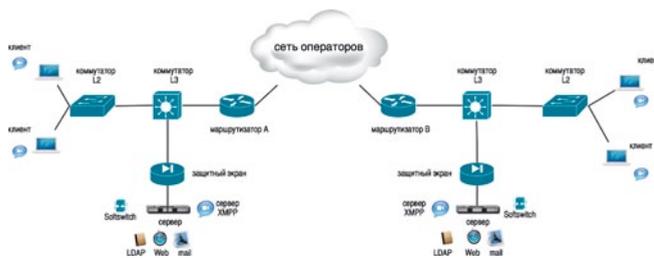


Рисунок 1 — Структурная схема ЛВС и выхода во внешнюю сеть

¹ The article was prepared with financial support from the RF Ministry of Education and Science under the framework of government contract No. 07514114095 of Federal Target Program “Research and development in priority areas of development of Russian scientific and technological complex for 2007-2013”

До недавнего времени технология Ethernet рассматривалась только как транспортная технология для передачи данных в локальных вычислительных сетях. Однако стремительный рост скорости от 10 Мбит/с до 1 Гбит/с (и в самом ближайшем времени до 10 Гбит/с) при невысокой стоимости единицы переданной информации, относительная простота дизайна и обслуживания обеспечивают использование технологии Ethernet в том числе и со стороны операторов связи и провайдеров услуг Интернет. Ранее интерес был чисто теоретическим, поскольку были неочевидны гарантии надежности в сетях Ethernet, а также отсутствовали какие-либо механизмы обеспечения качества обслуживания. Тем не менее, известно предоставление услуг с помощью простой сети Fast Ethernet на магистрали, где гарантией качества обслуживания (Quality of Service, QoS) была полоса пропускания, заведомо и намного превышающая весь входящий трафик. Этот случай характерен для сетей, нацеленных на передачу трафика для высокоскоростного транспорта, когда необходимо скорость сочетать с проверкой качества передаваемой информации (TCP/IP). Однако появление концепции мультисервисных услуг на базе протокола IP, подразумевающей интеграцию данных, телефони и, возможно, трафика видео, предъявило более серьезные требования к сети по надежности и обеспечению QoS, чем требования, которые существовали ранее. Кроме передачи обычного трафика данных, некритичного к задержкам и количеству потерянных пакетов, технологии Ethernet предстояло решить задачу передачи интегрированного трафика. Первым шагом стало появление стандарта IEEE 802.1Q/p, описывающего распределенные виртуальные сети (tag switching VLAN) и определяющего механизм приоритизации трафика на канальном уровне. Несмотря на то что стандарт был направлен на изменение ситуации в секторе ЛВС и корпоративных сетях, оборудование, поддерживающее 802.1Q/p, уже позволило создавать группы VLAN и обеспечивать приемлемое качество обслуживания путем присвоения приоритетов виртуальным сетям (в соответствии с восемью классами).

Спецификация **IEEE 802.1p**, создаваемая в рамках процесса стандартизации IEEE 802.1Q, определяет метод передачи информации о приоритете сетевого трафика. Стандарт 802.1p специфицирует алгоритм изменения порядка расположения пакетов в очередях, с помощью которого обеспечивается своевременная доставка чувствительного к временным задержкам трафика. В дополнение к определению приоритетов стандарт 802.1p вводит важный протокол GARP (Generic Attributes Registration Protocol) с двумя специальными его реализациями. Первая из них — протокол GMRP (GARP Multicast Registration Protocol), позволяющий рабочим станциям делать запрос на подключение к домену групповой рассылки сообщений. Поддерживаемую этим протоколом концепцию назвали подсоединением, инициируемым «листьями». Протокол GMRP обеспечивает передачу трафика только в те порты, из которых пришел запрос на групповой трафик, и хорошо согласуется со стандартом IEEE 802.1Q.

IEEE 802.1Q — открытый стандарт, который описывает процедуру тегирования трафика для передачи информации о принадлежности к VLAN. Так как 802.1Q не изменяет заголовки кадра (фрейма), то сетевые устройства, которые не поддерживают этот стандарт, могут передавать трафик без учета его

принадлежности к VLAN. 802.1Q помещает внутрь фрейма тег, который передает информацию о принадлежности трафика к VLAN.

Размер тега — 4 байта. Он состоит из следующих полей.

Tag Protocol Identifier (TPID) — идентификатор протокола тегирования. Размер поля 16 бит. Указывает, какой протокол используется для тегирования. Для 802.1q используется значение 0x8100.

Priority — приоритет. Размер поля 3 бита. Используется стандартом IEEE 802.1p для задания приоритета передаваемого трафика.

Canonical Format Indicator (CFI) — индикатор канонического формата. Размер поля 1 бит. Указывает на формат mac адреса. 0 — канонический, 1 — неканонический. CFI используется для совместимости между Ethernet и Token Ring-сетями. CFI — однобитовый флаг, который всегда равен 0 для кадров Ethernet. CFI для идентификации, если в поле данные находятся данные других стандартов, не Ethernet, например Token Ring. В таком случае этот бит будет равен 1. Если кадр был получен с Ethernet-порта и CFI равен 1, то этот кадр должен быть перенаправлен на untagged-порт (рис. 2).

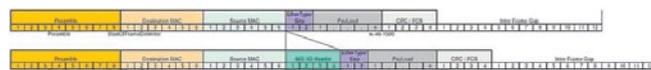


Рисунок 2 — Формат кадра

VLAN Identifier (VID) — идентификатор VLAN'a. Размер поля 12 бит. Указывает, какому VLAN'у принадлежит фрейм. Диапазон возможных значений VID от 0 до 4094.

Если используется стандарт Ethernet II, то 802.1Q вставляет тег перед полем «Тип протокола». Так как фрейм изменился, пересчитывается контрольная сумма. В стандарте 802.1Q существует понятие Native VLAN. По умолчанию это VLAN 1. Трафик, передаваемый в этом VLAN, не тегуется. Существует аналогичный 802.1Q проприетарный протокол, разработанный компанией Cisco Systems — ISL.

Вставка тега 802.1Q в кадр Ethernet II. Однако появление сетей с маршрутизацией и приоритизацией между VLAN не могло полностью удовлетворить требования, предъявляемые к сети оператора. Чтобы справиться с потенциальными проблемами передачи телефонного разговора по пакетной сети, необходимо было обеспечить качество услуг «из конца в конец» и еще большую гибкость в управлении полосой пропускания.

Под качеством обслуживания (Quality of Service, QoS) в общем случае принято понимать предоставление пользователям и приложениям в сети предсказуемого сервиса по доставке данных. Конкретное же определение и параметры качества обслуживания главным образом определяются типом приложения. Например, для передачи голосового трафика важнейшими параметрами QoS являются задержка и вариация задержки на определенном интервале времени, в то время как потеря некоторой части пакетов допустима. Параметры качества обслуживания можно разбить на три группы:

- параметры пропускной способности (минимальная, средняя и максимальная скорость передачи);
- параметры задержек передачи пакетов (средние и максимальные величины задержек и вариаций задержек);

- параметры надежности передачи (уровень потерь и искажений пакетов).

Измерение указанных параметров производится на определенном интервале времени. Чем меньше этот временной интервал, тем более жесткие требования предъявляются к сети, а следовательно, ко всем ее элементам, поскольку обеспечение QoS «из конца в конец» требует взаимодействия всех узлов на пути трафика и определяется надежностью, функциональностью и производительностью самого «слабого звена». Например, очевидно, что невозможно гарантировать обеспечение приоритетной обработки VLAN в распределенной коммутируемой сети Ethernet, если по маршруту распространения данных установлен хотя бы один концентратор (hub Ethernet). Между клиентом — потребителем услуг транспортной сети и провайдером данных услуг может быть заключено «соглашение об уровне обслуживания» (Service Level Agreement, SLA), в котором определяются:

- плата за обслуживание в зависимости от выбранного уровня обслуживания;
- параметры QoS для данного уровня (максимальная задержка и вариации, пропускная способность, максимальное время восстановления сети после аварий и т. д.);
- методы измерений вышеуказанных параметров;
- штрафные санкции за необеспечение требуемого QoS;
- любые другие дополнительные статьи по обоюдному согласию.

Для предоставления различным пользователям индивидуального качества обслуживания требуется реализовать в сети различные механизмы управления QoS. Для IP-сетей это, например, RSVP и DiffServ, поддерживающие соответственно качество обслуживания для микротоков приложений и агрегированных потоков.

Модель службы QoS. Общая архитектура службы QoS включает в себя элементы, выполняющие следующие функции (рис. 3):

- обработку входящего трафика в соответствии с требованиями качества обслуживания;
- осуществление QoS-сигнализации в сети для поддержки качества обслуживания end-to-end;
- обеспечение возможности управления распределением ресурсов сети (политика, определение потоков, учет и т. д.).

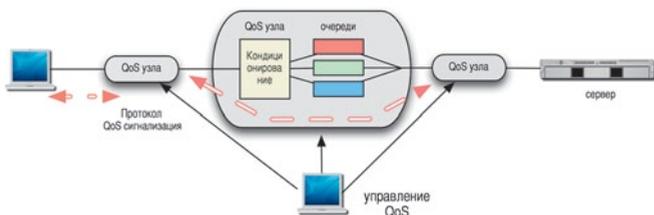


Рисунок 3 — Архитектура службы QoS

Важнейшими механизмами обеспечения QoS являются механизмы обслуживания очередей и кондиционирования трафика. Механизмы первого типа могут поддерживать различные алгоритмы обработки пакетов (от простейшего FIFO — «первый пришел — первый обслужен» до сложных алгоритмов взвешенного обслуживания).

В любых коммутаторах Ethernet по умолчанию реализован алгоритм FIFO, согласно которому при переполнении буфера сбрасывается кадр, не помещающийся в оставшуюся память, независимо от типа трафика и требований по его обработке. Поскольку этот подход неприемлем для дифференцированного обслуживания потоков — совокупности пакетов, имеющих общие признаки (например, адрес узла-получателя), в современных коммутаторах дополнительно используются алгоритм приоритетной обработки (реализован в коммутаторах Ethernet с поддержкой 802.1Q/p) и алгоритм взвешенного обслуживания. Комбинацией указанных алгоритмов является алгоритм взвешенного справедливого обслуживания (WFQ). Различные реализации именно этого алгоритма появились в оборудовании, поддерживающем стандарт DiffServ.

Модель кондиционирования трафика — это определение типа пакетов и отведение в определенную очередь.

$$\left. \begin{array}{l} p_1 [b_0, b_1, \dots, b_k] \\ p_2 [b_0, b_1, \dots, b_k] \\ p_3 [b_0, b_1, \dots, b_k] \\ \dots \\ p_j [b_0, b_1, \dots, b_k] \end{array} \right| \subset CL \left\{ R_j(b_k, b_{k+1}, \dots, b_{k+15}) \in P_j^M \right\}, \quad (1)$$

где b_j — биты кадра;

$R_j(b_k, \dots, b_{k+15})$ — решающее правило для j типа пакета (модель

Хемминга $R_j(b_k) = \sum_i^k (b_i - b_i^{*j})^2$, где b_i^{*j} — центральные значения битов, соответствующие j состоянию);

P_j^M — существующая классификация очередей j для пакетов.

По формуле (1) осуществляется определение типа пакетов и отведение в определенную очередь P_j^M (соответствие таблицы потоков).

Технология DiffServ в сетях Ethernet. Основная идея технологии DiffServ (Differential Services) заключается в разделении трафика в сети на несколько крупных классов, для каждого из которых будет обеспечиваться определенный QoS в рамках некоторой области, называемой доменом DiffServ. На границах домена происходит кондиционирование трафика (1), т. е. его классификация (CL), подразумевающая анализ входящих пакетов, сопоставление полученной информации с таблицей потоков P_j^M , а также маркировка пакетов специальным кодовым словом DSCP (DiffServ Code Point). Данные функции выполняет так называемый порт доступа в домен (port-access):

$$CL(\text{classification}) \Rightarrow \{ p_i \in P_j^M \Leftrightarrow (R_j(b_k) = f_j(b_k)) \};$$

$$p_i \Rightarrow (p_i \& DSCP \rightarrow p_i^{DSCP}) \Rightarrow (\text{port} - \text{access});$$

где P_j^M — таблица потоков.

Далее обработка трафика на промежуточных узлах, принятие решения о направлении пакета в ту или иную очередь осуществляется исключительно по кодовому слову DSCP, расположенному в заголовке пакета IP (поле TOS). Обработка классифицированного трафика внутри домена осуществляет-

ся со скоростью коммутации — достаточно считать 6 бит кодового слова и отправить пакет в соответствующую очередь, после чего вступает в действие алгоритм взвешенного справедливого обслуживания (рис. 4).

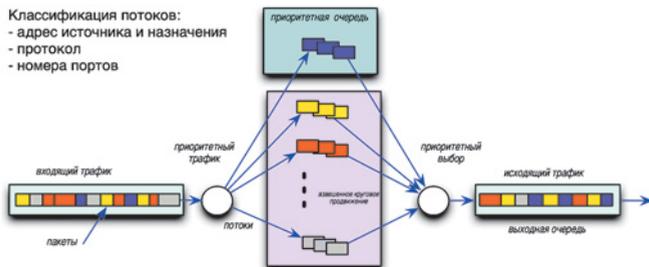


Рисунок 4 — Алгоритм технологии DiffServ

Возможны различные реализации данного алгоритма в оборудовании разных производителей. Например, в маршрутизаторах Cisco компании Cisco Systems для классификации используются два младших бита из трехразрядного подполя IP Precedence поля TOS. По умолчанию классу 0 выделяется 10% полосы пропускания, классам 1, 2 и 3 — 20, 30 и 40% соответственно. Для очередей, основанных на классах QoS, пакеты, не назначенные ни в одну группу, принадлежат группе 0 и автоматически имеют 1% от общей пропускной способности на всю группу. Общий вес остальных групп не может превышать 99%, а если после назначения всех весов остается свободная полоса пропускания в канале, она автоматически отводится под группу 0

$$\begin{aligned}
 p_i^{DSCP} [b_0, b_1, \dots, b_k] &\subset CL \{ R_i(b) = f_i(b_k, b_{k+1}, \dots, b_{k+15}) (l \in j) \subset (M^l) \Rightarrow V_j \}; \\
 p_g^{DSCP} [b_0, b_1, \dots, b_k] &\subset CL \{ R_g(b) = f_g(b_k, b_{k+1}, \dots, b_{k+15}) (g \notin j) \subset (M^l) \Rightarrow V_g = 0.1 \\
 (\sum_j V_j = 1) &\Rightarrow \{V_0 = 0.1; V_1 = 0.2; V_2 = 0.3; V_3 = 0.4\}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Другой пример реализации — коммутаторы OptiSwitch компании Optical Access, которые предлагают администратору при настройке параметров QoS выбрать один из режимов работы с 4 очередями:

- 1 — взвешенное круговое обслуживание (Weighted Round Robin, WRR);
- 2 — смешанное обслуживание 1/3;
- 3 — смешанное обслуживание 2/2;
- 4 — обслуживание с прямым приоритетом (Strict Priority, SP).

В первом случае каждой очереди назначаются весовые коэффициенты, задаваемые в количестве пакетов или байтов (по умолчанию — 1, 2, 3 и 4), в соответствии с которыми происходит продвижение пакетов из очередей. Так, по умолчанию из высокоприоритетной очереди в выходной буфер будут перенаправлены четыре пакета, а из низкоприоритетной — один. В случае использования механизма прямого приоритета (пункт 4) будет действовать довольно грубое, но эффективное правило — очереди с более низким приоритетом не обслуживаются, если есть хотя бы один необработанный пакет в высокоприоритетной очереди. Этот механизм аналогичен механизму, реализованному в стандарте 802.1Q/p. Во втором и третьем случае имеет место смешанное обслуживание, ког-

да часть очередей работает по WRR-алгоритму, а часть — по SP.

Другим важным средством обеспечения QoS в технологии DiffServ является механизм формирования трафика. Данный механизм предназначен для сглаживания пульсаций «взрывного» трафика, уменьшения неравномерности продвижения пакетов. В аппаратной реализации стандарта DiffServ используется механизм, работающий по алгоритму token bucket, или «маркерное ведро» (рис. 5).

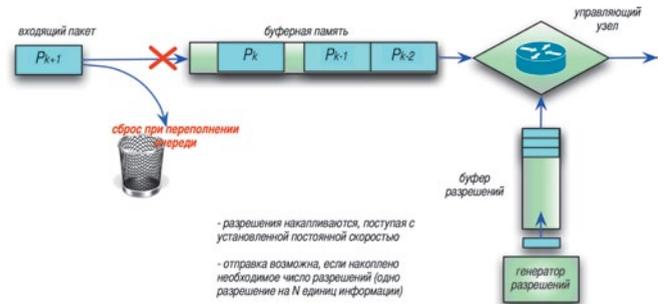


Рисунок 5 — Алгоритм «маркерное ведро»

Суть алгоритма «маркерное ведро» заключается в следующем. Максимальная средняя скорость отправки потока пакетов из управляющего узла зависит от скорости прибытия в него разрешений на передачу N единиц данных. Очередной пакет может быть отправлен только при получении числа разрешений, достаточного для передачи данных, объем которых больше или равен размеру пакета. Если пакет поступит в управляющее устройство, не располагающее необходимым количеством разрешений, он будет отброшен так же, как и пакет, поступивший в переполненный буфер-формирователь. На рис. 6 графически показано, как происходит формирование и сглаживание пульсаций взрывного трафика по алгоритму token bucket. Пусть имеется некий буфер с конечным объемом. Поступающий со скоростью интерфейса или для коммутаторов Ethernet со «скоростью провода» трафик постепенно заполняет буфер-формирователь (серая область). Генератор разрешений выдает токены с постоянной скоростью, создавая прообраз идеального трафика, к форме которого стремятся привести входной трафик (скорость генерации показана фиолетовой линией). Воздействие механизма, работающего по алгоритму token bucket, придает трафику на выходе нужную «временную форму» (светло-зеленая область).

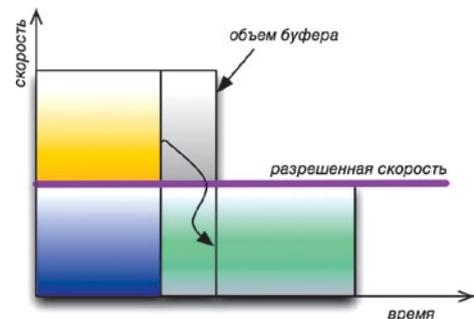


Рисунок 6 — Алгоритм сглаживания взрывного трафика

Модель работы алгоритма «маркерное ведро» приведена ниже:

$$\sum_{k \in K} p_k^{DSCP} \leq P^* \text{ — буфер памяти;}$$

$if(j \geq K) \Rightarrow p_j^{DSCP} \rightarrow del$ — удаление пакетов при переполнении буфера приема;

K — ограничения количества байт памяти;

$$P^{r*} = \sum_{i=1}^M P_i^r \text{ — буфер генератора разрешений;}$$

$k \exists i \rightarrow (i \leq K) \Rightarrow p_k^{DSCP} = p_k^{DSCP} \& (P_i^r \equiv 1)$ — пакет на выходе;
 $k \exists i \rightarrow ((i \geq K)) \Rightarrow p_k^{DSCP} = p_k^{DSCP} \& (P_i^r \equiv 0) \rightarrow null$ — пакет на выходе отсутствует.

Сеть должна гарантировать, что трафик будет обслуживаться в соответствии с оговоренными в SLA параметрами QoS.

Поток (flow) — последовательность пакетов, движущихся от источника А в пункт назначения В (С), каждый из которых может быть однозначно идентифицирован по 16-битной комбинации из первых 64 байт IP-заголовка и/или заголовка TCP/UDP (номер порта приложения) (рис.7).

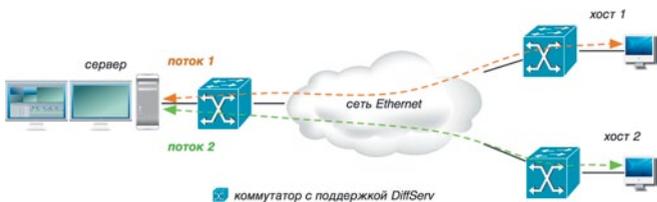


Рисунок 7 — Работа технологии DiffServ

Порт доступа (port access) — порт коммутатора для подключения контроллера. Точка классификации/кондиционирования трафика. Функции порта:

- анализ входящего трафика (чтение заголовков L3 и L4);
- проверка на соответствие в таблице потоков коммутатора и распределение пакетов по очередям в соответствии с описанием потоков;
- фильтрация неклассифицированного трафика (пакетов, не принадлежащих ни одному логическому потоку);
- установленное ограничение скорости для каждого потока (алгоритм «маркерное ведро»);
- маркировка IP-заголовка пакетов в поле TOS кодовым словом DSCP (DS Code Point).

Внутренний порт (interior port) соединяет два объекта в домене DiffServ. Например, это магистральные порты коммутаторов Gigabit Ethernet, связанных по оптоволокну. Функции порта:

- анализ входящего трафика (чтение DSCP);
- распределение пакетов по очередям в соответствии с DSCP;
- переназначение кодового слова в случае, если порт является выходным из домена DiffServ, для обеспечения соответствия уровней QoS между коммутаторами различных производителей.

Внешний порт (exterior port) соединяет домен DiffServ с внешним миром (вершина домена). Функции порта анало-

гичны функциям порта доступа. Внешний порт обрабатывает трафик, входящий в домен.

В случае с применением технологии для организации доставки информации от контроллеров объектов высокоскоростного транспорта, работающих по протоколу хтpp, необходимо дифференцировать трафик. Этим занимаются приложения. Параметры управления движением должны иметь наивысший приоритет. К ним относятся такие параметры, как местоположение по координатам GPS/ГЛОНАСС, положение (клиренс) движущегося транспортного средства над путем, состояние параметров охлаждающей системы на борту, т. е. те параметры, которые контролируют текущее состояние движущегося транспортного средства.

Помимо параметров на борту, важны параметры, контролирующие состояние пути, проникновение посторонних предметов, так как высота левитации достигает 50 мм. Поэтому контроль должен осуществляться непрерывно и с высокой достоверностью, без пропуска событий незаконного вторжения. Поскольку параметры от движущегося объекта до системы хранения должны передаваться с большой скоростью, необходимо задавать высокий приоритет для информационных потоков, отвечающих за управление и безопасность движения. Структура соединений и расположения сервисов в сети и использование протокола хтpp 2.0 приведена на рис. 8.

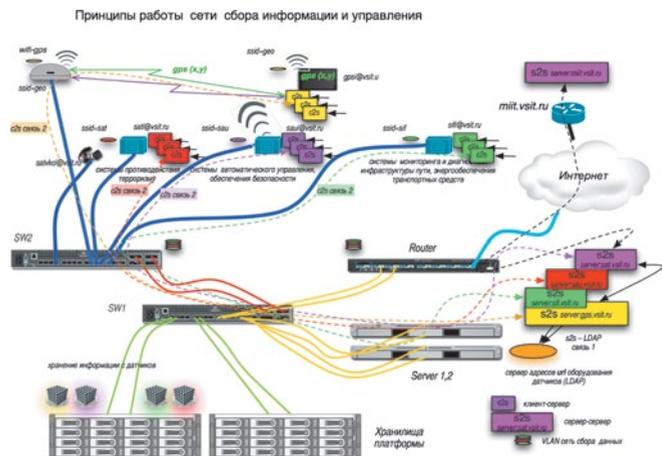


Рисунок 8 — Сеть сбора информации

Известны протоколы sip и хтpp, наиболее приемлемые для организации сетей сбора информации. Принципиальное отличие этих протоколов состоит в том, что sip использует в основе протокол udp без проверки правильности передаваемой информации, хтpp основан на использовании протокола tcp с проверкой правильности передаваемой информации. ХМPP ориентирован на передачу массивов информации со встроенными в алгоритм обмена технологиями аутентификации, авторизации соединений, поэтому для эффективного решения вопросов информационного обмена данными используем хтpp. В случаях организации потокового вещания в рамках сети эффективно использовать протокол sip (rtsp, rtcp, sdp).

В сети имеются клиенты и серверы, включенные в соответствующие виртуальные локальные сети (табл. 1).

Таблица 1 — Серверы и датчики

VLAN ssid	Датчики клиент-серверы URL	Сервер	Место установки
geo	gpsi@vsizt.ru	gps.vsizt.ru	Сеть транспортных средств
sat	sati@vsizt.ru	sat.vsizt.ru	Сеть систем предотвращения террористических угроз
sau	sau@vsizt.ru	sau.vsizt.ru	Сеть автоматического управления
sif	sifi@vsizt.ru	sif.vsizt.ru	Сеть инфраструктуры

Клиент-сервер c2s включен в транспортную сеть полигона. Каждый клиент-сервер-датчик имеет свой URL (включенные в VLAN сети через порты коммутатора SW2), который прописывается в базе данных LDAP, с которой взаимодействует соответствующий jabber-сервер (с2s связь 1) (см. рис. 8). Например, датчики `gpsi@vsizt.ru`, где `i` — идентификатор соответствующего датчика, взаимодействуют с jabber-сервером `geo.vsizt.ru`. Назначение базы данных LDAP — определение принадлежности вызываемого датчика к сети. Имена датчиков `xxxi@vsizt.ru` записаны в базе данных LDAP группы `xxx`, где прописаны пароли доступа к соответствующим датчикам `xxxi@vsizt.ru`.

Алгоритм взаимодействия клиента с сервером. Процедура передачи сообщения (связи 2) в сети полигона между датчиками и серверами следующая.

Установление соединения. При подключении к серверу вся сессия между клиентом (датчик с URL) и сервером (логин, пароль и все, что передается) шифруется при помощи одного из протоколов — SSL либо TLS.

Статус-сообщение о состоянии клиента и пересылка данных на сервер осуществляются через атрибуты пересылаемых сообщений. Обратная процедура (распаковка и расшифровка). Клиент-датчик `xxxi@vsizt.ru` отправляет данные другому серверу (если клиент подключен к другому серверу). В первом случае соединение называется s2c (server to client) и происходит аналогично c2s. Во втором случае соединение называется s2s (server to server) (связь 3). В этом случае сообщение при необходимости шифруется и передается на другой сервер, где происходит соединение s2c.

Этот режим используется при передаче данных от сервера к серверу: `geo.vsizt.ru` — `sau.vsizt.ru`; `sif.vsizt.ru` — `sat.vsizt.ru` для систем автоматического, интеллектуального управления или слежения за инфраструктурой, а также для соединения клиента-датчика с клиентом — участником платформы в случае необходимости получения данных с объектов наблюдения, установленных на полигоне.

Хранение информации, поступающей из датчиков-клиентов, осуществляется на хранилищах XSan. Сервера `gps.vsizt.ru`, `sif.vsizt.ru`, `sau.vsizt.ru`, `sat.vsizt.ru` производят запись данных в формате XML в базу данных, сформированную на XSan. Обращение к данным осуществляется из внутренней сети приложениями систем, развернутых на серверах полигона. Приложение имеет собственный jabber-сервер, который прописан в LDAP с правами получения информации из соответствующего сетевого хранилища, прописанного в серверах сбора информации: `store.gps.vsizt`, `store.sif.vsizt`, `store.sau.vsizt`, `store.sat.vsizt`. Приложение может обращаться к данным, находящимся в соответствующем хранилище, через свой собственный сервер jabber: `pril.xxx.vsizt`, где `xxx` — идентификатор сервера. XML-поток формируется от хранилища `store.xxx.vsizt` до приложения. Далее поступившие данные используются приложением в соответствии с заданной моделью обработки информации.

Режим прямого соединения сервера jabber `pril.xxx.vsizt` приложения и датчика-клиента URL (`xxxx@vsizt.ru`) предусмотрен. Этот режим может использоваться при настройке и пуске системы или при различного рода критических ситуациях. В этом случае данные от объектов (датчик `xxxi@vsizt.ru`), прописанных в соответствующей группе объектов LDAP, поступают на соответствующий сервер: `gps.vsizt.ru`, `sif.vsizt.ru`, `sau.vsizt.ru`, `sat.vsizt.ru`, а далее — на соответствующий jabber-сервер приложений: `pril.xxx.vsizt`. Запись в хранилище `store.xxx.vsit` приложения может осуществляться по желанию.

Выводы

1. Использование протокола 802.1 Q/p обеспечивает работу критически важных приложений во внутренней сети высокоскоростного транспорта, обеспечивая приоритезацию их трафика путем задания для каждого пакета уровня важности.

2. Использование протокола `xtprp` обеспечивает требуемую защиту передаваемой информации путем использования современных алгоритмов шифрования, взаимную аутентификацию сторон соединения, обеспечивая соединение передвигающихся транспортных средств с хранилищами информации и режим прямого доступа к бортовым контроллерам.

3. Применение протокола `xtprp` позволяет центром хранения информации использовать беспроводной Wi-Fi для связи с высокоскоростным транспортным средством, проверяя на целостность пакеты и защищая потоки через алгоритмы шифрования.

УДК 629.4.053.3

Александр Михайлович Костроминов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС),
Татьяна Валентиновна Крючкова, старший преподаватель кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ РАДИОВИДИМОСТИ МЕТОК ДЛЯ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ПРИВЯЗКИ К ПУТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА

Aleksander M. Kostrominov, DSc in Engineering, Professor of 'Electric communication' chair of Petersburg State Transport University (PSTU),
Tatyana V. Kryuchkova, senior lecturer of 'Electric communication' chair of Petersburg State Transport University (PSTU)

Regression Model Of Tags Radio Visibility Zone For The System Of Non-Contact Binding To The Track Of Underground Rolling Stock

Аннотация

Рассматриваются вопросы влияния внешних факторов на протяженность зоны радиовидимости меток ридером при использовании RFID-технологии в системе бесконтактной привязки к пути подвижного состава метрополитена. В качестве инструмента для решения поставленных вопросов использована регрессионная модель. Объектом исследования является метка (транспондер). Рассмотрены факторы, воздействующие на метку, и построена математическая модель, которая адекватно описывает зависимость протяженности зоны радиовидимости RFID-элементов от расположения метки, благодаря которой можно оценить степень влияния различных факторов на протяженность этой зоны. Даются практические рекомендации по расположению меток вдоль пути.

Ключевые слова: RFID-технология, радиометка, ридер, зона радиовидимости, регрессионная модель.

Abstract

They are considered the issues of external factors influence on the zone length of tags radio visibility by reader when using RFID – the technology in the system of non-contact binding to the track of underground rolling stock. The regression model is used as the tool to solve the set problems. The object of the research is a tag (transponder). The factors, which influence the tag are considered and it is built the mathematical model, which describes the dependence of zone length of RFID-element radio visibility from the tag position, due to which it is possible to estimate the influence rate of various factors on this zone length. The practical recommendations on tags position along the track are given.

Key words: RFID-technology; RFID tag; reader; radio visibility zone; regression model.

Система бесконтактной привязки к пути (СБПП) головных вагонов поездов с использованием RFID-технологий является составной частью комплекса автоматического управления движением поездов в метрополитене. Взаимодействие меток (транспондеров), расположенных вдоль пути и на станциях, с ридерами, установленными на головных вагонах, осуществляется по радиоканалу [1]. Для надежного считывания информации из меток существенное значение имеет протяженность зоны радиовидимости метки ридером L . Чем больше L , тем больше происходит сеансов обмена информацией между меткой и ридером и, следовательно, выше надежность работы системы СБПП.

Зона радиовидимости L в СБПП — случайная величина. Причиной ее изменчивости являются дисперсионные свойства меток и ридеров. Однако при этом она еще зависит и от различных внешних факторов, обусловленных особенностями поверхностей тоннелей и подплатформенными конструкциями: неровностями, наличием различного рода устройств, сужающих площади поверхностей для крепления меток либо изменяющих расстояние от метки до антенны ридера. В этом случае возникает вопрос: как изменится величина L , если, например, по местным условиям метку приходится устанавливать на различном расстоянии от траектории движения антенны ридера, или под различным углом наклона к горизонтальной (вертикальной) плоскости, или ниже (выше) горизонтальной плоскости, на которой находится антенна ридера?

В качестве инструмента для ответа на этот вопрос будем использовать метод регрессионного анализа [2].

Построение регрессионной модели

Выделим факторы, характерные для метки как объекта исследования:

- управляемые и контролируемые $X=(x_1, x_2, \dots, x_k)$, которые можно целенаправленно менять (например, факторы, которые определяют различное положение метки относительно ридера);

- неуправляемые, но контролируемые $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$, которые можно измерить в процессе исследования, но нельзя изменить (например, дисперсионные свойства элементов радиочастотной идентификации);
- помехи или возмущающие воздействия (неконтролируемые и неуправляемые) $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, которые изменяются с течением времени случайным образом (например, положение антенны в метке, старение деталей и электро-радиоэлементов и т. д.).

Очевидной функцией отклика на изменение факторов является протяженность L зоны радиовидимости метки ридером.

Задача исследования состоит в том, чтобы при фиксированных параметрах $u_j = \text{const}$ ($j = 1 \dots m$) и $z_v = \text{const}$ ($v = 1 \dots n$) выбрать такие значения $x_i = \text{var}$ ($i = 1 \dots k$), при которых выходной параметр объекта y достигает оптимальной величины. Другими словами, необходимо оптимизировать функцию $L = f_{\text{опт}}(x_i = \text{var}; u_j = \text{const}; z_v = \text{const})$ при условии, что параметр x_i изменяется в определенных пределах $x_{\text{ин}} \leq x_i \leq x_{\text{ив}}$ ($i = 1 \dots k$).

Поскольку протяженность L зоны радиовидимости метки ридером является случайной величиной, зависящей от k переменных x_i ($i = 1 \dots k$), необходимы методы экспериментального определения влияния переменных x на L .

Математической моделью системы служит функция отклика, связывающая параметр оптимизации L , характеризующий результаты эксперимента, с переменными параметрами, которыми варьируют при проведении опытов,

$$L = f(x_1, x_2, \dots, x_k), i = 1, 2, \dots, k, \quad (1)$$

где L — целевая функция (функция отклика); x_i ($i = 1, 2, \dots, k$) — независимые переменные (факторы).

В общем случае, когда исследование поверхности отклика осуществляется при неполном знании механизма изучаемых явлений, аналитическое выражение функции отклика неизвестно. Поэтому представление функции отклика описывают полиномом вида

$$L = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{ij} b_{ij} x_i x_j, \dots, i=1, 2, \dots, k-1, j=2, 3, \dots, k, i < j, \quad (2)$$

где b_0 — свободный член уравнения, характеризующий значение функции в центре плана;

b_i — линейные эффекты;

b_{ij} — эффекты парного взаимодействия и т. д. [2].

Коэффициенты b_0, b_i, b_{ij} получают в результате эксперимента. При планировании эксперимента основной задачей является выбор существенных факторов, которые влияют на изменение протяженности зоны радиовидимости.

При планировании эксперимента факторы должны быть [2]:

- управляемыми, т. е. экспериментатор, выбрав нужное значение фактора, может его поддерживать постоянным в течение всего опыта;
- операциональными, т. е. для точного определения фактора указывается последовательность действий, с помощью которых устанавливаются его конкретные значения;
- достаточной степени точности, которая должна быть возможно более высокой;

- однозначными, т. е. факторы должны быть непосредственными воздействиями на объект.

При совокупности факторов необходимо учитывать:

- условие совместности, когда все их комбинации осуществимы и безопасны;
- независимость факторов, т. е. возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов;
- отсутствие корреляции между факторами.

Рассмотрим факторы, которые могут оказывать влияние на протяженность длины зоны радиовидимости при размещении меток вдоль пути и на станциях. К ним относятся:

- расстояние метки от траектории движения антенны ридера (важно на станциях и в тупиках);
- высота расположения метки относительно центра антенны ридера;
- угол отклонения RFID-элементов от горизонтальной поверхности, параллельной поверхности пути;
- угол отклонения RFID-элементов от вертикальной поверхности, перпендикулярной поверхности пути.

Выбирая план эксперимента, надо стремиться к уменьшению числа опытов, зависящего от количества факторов. Поэтому необходимо учитывать только те факторы, которые оказывают наиболее существенное влияние на значение функции отклика, отсекая малозначительные.

Можно предположить, что наиболее значимыми из них являются следующие: расстояние по нормали к оси пути от антенны до метки (под нормалью понимаем направление максимального излучения при нулевом угле отклонения от вертикали) (рис. 1); высота траектории движения антенны ридера по отношению к метке; угол α наклона метки относительно вертикальной плоскости (см. рис. 1); угол β наклона метки относительно горизонтальной плоскости (рис. 2).

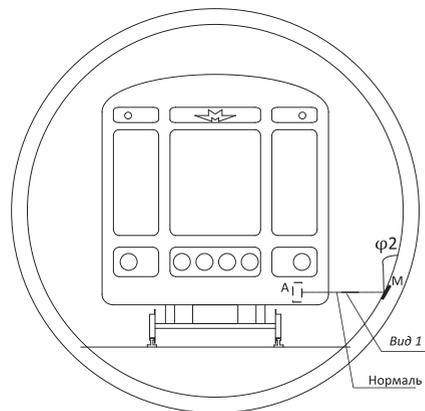


Рисунок 1 — Расположение метки на стене тоннеля: $\varphi 2$ — угол отклонения метки от вертикальной плоскости

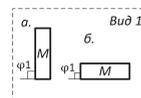


Рисунок 2 — Расположение метки на стене тоннеля: $\varphi 1$ — угол отклонения метки от вертикальной плоскости



Поскольку антенны ридера располагаются под всеми вагонами одинаково вследствие конструктивных особенностей вагонов, рассматривать углы отклонений антенны от плоскостей расположения меток в качестве существенных факторов не будем. Как показали предварительные эксперименты, различные изменения угла поворота метки вокруг своей оси, проходящей вдоль длинной стороны метки, не оказывают существенного влияния на протяженность зоны радиовидимости, вследствие чего эти факторы также не рассматриваются как существенные.

Таким образом, априори значимые факторы представлены в табл. 1.

Факторы имеют различную размерность, и опыты проводятся обычно на двух уровнях факторов $[x_{ни}, x_{ви}]$. Для упрощения обработки результатов экспериментов уровни факторов нормализуются, т. е. центрируются и нормируются [3]. За нулевой принимается уровень x_{0j} , соответствующий середине интервала $[x_{ни}, x_{ви}]$,

$$x_{0i} = \frac{x_{ни} + x_{ви}}{2} \quad (3)$$

Точка факторного пространства с координатами $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}$ будет являться центром плана.

Если для каждого фактора выбрать интервал варьирования

$$\Delta x_i = \frac{x_{ви} - x_{ни}}{2} \quad (4)$$

то прибавление Δx_i к нулевому уровню дает верхний уровень $x_{ви}$, а вычитание — нижний уровень $x_{ни}$. Линейное преобразование $x_i = \tilde{x}_i \Delta x_i + x_{0i}$ дает возможность перейти к новой системе координат $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k$, в которой функция (2) принимает вид

$$L = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \tilde{x}_i + \sum_{i,j} b_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j, \dots, i=1, 2, \dots, k-1, j=2, 3, \dots, k, i < j. \quad (5)$$

При значениях фактора $\tilde{x}_i = \pm 1$ уровни исходных факторов становятся равными $x_{ви}$ и $x_{ни}$ соответственно. Следовательно, для всех безразмерных и нормализованных факторов $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k$ в новой системе координат верхний уровень равен +1, нижний уровень равен -1, а координаты центра плана равны нулю и совпадают с началом координат.

Нормализация переменных существенно упрощает построение математической модели объекта. После построения модели с нормализованными факторами и ее оценки можно вернуться к многочлену (2) с натуральными факторами, используя соотношение

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i} \quad (6)$$

Выбор экспериментальной области факторного пространства связан с тщательным анализом априорной информации, на основании которой определяются ограничения для значенных факторов.

В табл. 1 указаны уровни, верхний и нижний, на которых выбранные факторы варьируются в эксперименте. Выбран основной (нулевой) уровень каждого фактора и определен интервал варьирования.

В данном случае применяется метод регрессионного анализа при определенных условиях. Во-первых, L — случайная величина с нормальным законом распределения, что было установлено экспериментально [1]. Во-вторых, дисперсия L не должна зависеть от абсолютной величины L . Этот постулат проверяется с помощью критериев однородности дисперсий в разных точках факторного пространства. В-третьих, значения факторов — не случайные величины.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней, является полным факторным экспериментом. Поскольку рассматриваются два уровня факторов, верхний и нижний, то имеем полный факторный эксперимент типа 2^k .

Таким образом, количество экспериментов для построения регрессионной модели определяется по формуле $N=2^k$, где k — число факторов, 2 — число уровней, т. е. производится 16 экспериментов.

Условия экспериментов представлены в виде табл. 2 — матрицы планирования, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы — значениям факторов.

Полный факторный эксперимент типа 2^k обладает следующими свойствами [2]:

- симметричностью относительно центра эксперимента, т. е. алгебраическая сумма элементов вектор-столбца каждого фактора равна нулю;
- нормировкой, т. е. сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов;
- ортогональностью, т.е. сумма почленных произведений любых двух вектор-столбцов матрицы равна нулю.

Таблица 1 — Факторы и уровни, на которых они варьируются в эксперименте

Фактор			Код и его значение		Центр плана
Обозначение	Наименование	Размерность	-1	+1	0
x_1	Расстояние по нормали к оси пути от антенны ридера до метки (l) (см. рис. 1)	см	180	260	220
x_2	Высота траектории движения центра антенны ридера по отношению к метке h (см. рис. 1)	см	-20	+20	0
x_3	Угол наклона метки относительно горизонтальной плоскости φ_1 (см. рис. 2)	Град.	0	90	45
x_4	Угол наклона метки относительно вертикальной плоскости φ_2 (см. рис. 1)	Град.	-45	+45	0

Для решения задачи по определению зависимости протяженности зоны радиовидимости метки ридером от факторов, имеющих наиболее существенное влияние и указанных в табл. 1, в каждом режиме испытаний определяется зона радиовидимости метки. Эксперимент проводился следующим образом. Метка, установленная на макете, двигалась вдоль оси, параллельной плоскости, в которой располагалась антенна ридера. Изменялось расстояние по нормали к оси пути от центра антенны ридера до центра метки, высота траектории движения антенны ридера по отношению к метке, угол накло-

на метки относительно горизонтальной плоскости, угол наклона метки относительно вертикальной плоскости.

Проводился замер протяженности зоны радиовидимости метки ридером, который фиксировался в последнем столбце табл. 2. Чтобы оценить ошибку, испытания в каждом опыте проводились трижды.

План полного факторного эксперимента представлен в табл. 2, из которой видно, что все свойства матрицы имеют место.

Таблица 2 — Матрица планирования

№ эксперимента	\tilde{x}_0	Факторы				Произведения факторов					Оценка функции отклика		
		\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	\tilde{x}_3	\tilde{x}_4	$\tilde{x}_1\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_1\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_1\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_2\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_2\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_3\tilde{x}_4$	L	L_{cp}
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	315, 317, 313	315
2	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	264, 267, 261	264
3	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	309, 307, 311	309
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	254, 255, 257	255
5	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	439, 437, 441	439
6	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	410, 408, 412	410
7	+	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	436, 433, 439	436
8	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	404, 400, 402	402
9	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	325, 327, 323	325
10	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	275, 278, 272	275
11	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	320, 318, 322	320
12	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	265, 262, 268	265
13	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	450, 455, 445	450
14	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	420, 422, 424	422
15	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	445, 442, 448	445
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	415, 411, 419	415

Коэффициенты регрессии вычисляются по формуле

$$b_i = (1/N)\sum x_{ij}y_j, \quad (7)$$

где b_i — коэффициент регрессии i -го фактора, $i = 1 \div k$; N — число экспериментов, $j = 1 \div N$; x_{ij} — значение ij -го фактора в j -м эксперименте; y_j — значение j -й функции в j -м эксперименте.

В результате произведенных вычислений функция протяженности зоны радиовидимости метки ридером имеет вид

$$L_{cp} = 359,2 - 20,7\tilde{x}_1 - 3,3\tilde{x}_2 + 68,2\tilde{x}_3 + 5,4\tilde{x}_4 - 0,9\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + 5,6\tilde{x}_1\tilde{x}_3 + 0,3\tilde{x}_1\tilde{x}_4 + 0,4\tilde{x}_2\tilde{x}_3 - 0,06\tilde{x}_2\tilde{x}_4 + 0,2\tilde{x}_3\tilde{x}_4 \quad (8)$$

где $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \tilde{x}_4$ — нормализованные переменные, $\tilde{x}_1 = (l - 220)/40$; $\tilde{x}_2 = (H)/20$; $\tilde{x}_3 = (\varphi_1 - 45)/45$; $\tilde{x}_4 = (\varphi_2)/45$, $\tilde{x}_1\tilde{x}_2, \tilde{x}_1\tilde{x}_3$ и т. п. — характеризуют взаимное влияние рассматриваемых факторов.

После построения регрессионной модели встает задача проверки статистических гипотез о построенной модели.

Проверка статистической гипотезы о примерном равенстве (однородности) выборочных дисперсий по критерию Кохрена производится следующим образом: определяется отношение максимальной дисперсии из рассчитанных в каждой строке табл. 2 к сумме всех дисперсий:

$$G_{pac} = \frac{\max s_i^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2},$$

$$s_{y_i}^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (y_{im} - \bar{y}_i)^2,$$

где N — число экспериментов;

M — число параллельных опытов;

$y_{im} - \bar{y}_i$ — отклонение результата отдельного из трех параллельных опытов от среднего арифметического.

Рассчитанное значение $G_{pac} = 0,2$ сравнивается с табличным значением критерия Кохрена $G_{кр}(0,05; 2; 16)$ [4]. Поскольку $G_{pac} < G_{кр}(0,05; 2; 16)$, значит, гипотеза об однородности дисперсий принята, т. е. дисперсия L не зависит от абсолютной величины L .

В этом случае можно усреднять дисперсии и использовать следующую формулу:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(M-1)}. \quad (9)$$

Величина s_y^2 является дисперсией воспроизводимости, которая характеризует погрешность производимых экспериментов. Произведя расчет, получаем

$$S_{вос}^2 = 3,9.$$

Построенная математическая модель имеет смысл, если средние значения откликов различимы. Для проверки гипотезы о равенстве всех средних значений откликов рассчитывается величина

$$t_{pac} = \frac{\bar{y}_{max} - \bar{y}_{min}}{\sqrt{\frac{s_{max}^2 + s_{min}^2}{M}}}, \quad (10)$$

где \bar{y}_{max} и \bar{y}_{min} — максимальное и минимальное средние значения отклика;

s_{max}^2 и s_{min}^2 — значения максимальной и минимальной дисперсий;

M — количество измерений в каждой точке плана.

Рассчитанное значение t_{pac} сравнивается с табличным значением коэффициента Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и степени свободы $k = 2M - 2$ [3]. Гипотеза о равенстве всех средних значений откликов отвергается, так как t_{pac} оказывается больше $t(\alpha; k)$.

Далее производится проверка значимости каждого коэффициента по t -критерию Стьюдента. Для этого рассчитывается значение t -критерия

$$t_{pac} = \frac{|b_j|}{s_{вос}}$$

для каждого коэффициента и сравнивается с табличным значением критерия Стьюдента $t(\alpha; k)$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $k = 32$ степенях свободы [4]. Пренебрегая незначимыми коэффициентами (при $t_{pac} > t(\alpha; k)$), выражение функции протяженности зоны радиовидимости принимает вид

$$L_{cp} = 359,2 - 20,7\tilde{x}_1 - 3,3\tilde{x}_2 + 68,2\tilde{x}_3 + 5,4\tilde{x}_4 + 5,6\tilde{x}_1\tilde{x}_3. \quad (11)$$

При выборе модели, которая описывала бы функцию отклика $L = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, где x_1, x_2, \dots, x_k — факторы или независимые переменные, необходимо учитывать, что полученное с помощью модели значение отклика L должно минимально

отличаться от фактического. Модель, которая удовлетворяет такому требованию, называется адекватной.

Адекватность математической модели — это соответствие модели экспериментальным данным по выбранному критерию. В качестве критерия точности прогноза результатов проведенных опытов обычно выбирают сумму квадратов погрешностей, деленную на число степеней свободы (12),

$$s_{ad}^2 = \frac{1}{N-r} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - F(\tilde{x}_{1i}; \tilde{x}_{2i} \dots \tilde{x}_{ki}))^2, \quad (12)$$

где N — число точек плана эксперимента;

r — количество значимых параметров модели;

$F(\tilde{x}_i)$ — значение функции, рассчитанное по модели.

Величина s_{ad}^2 называется остаточной дисперсией или дисперсией адекватности.

В результате расчетов получаем $s_{ad}^2 = 4,06$.

При проверке адекватности модели сравниваются две дисперсии: ошибок прогноза модели s_{ad}^2 и погрешностей измерений $s_{вос}^2$. Модель считается адекватной, если выполняется условие $s_{ad}^2 < s_{вос}^2$.

Однако оказывается, что $s_{ad}^2 > s_{вос}^2$. В этом случае производится проверка гипотезы о равенстве дисперсий адекватности и воспроизводимости по критерию Фишера. Наблюдаемая в эксперименте величина критерия $F_{рас}$ вычисляется по формуле

$$F_{рас} = s_{ад}^2 / s_{вос}^2 = 1,04. \quad (13)$$

Критическое значение критерия Фишера $F(0,05; 10; 32) = 2,5$ [4].

Рассчитанное $F_{рас} < F_{табл,r}$ что показывает адекватность модели объекту.

Заключение

Построив модель, которая адекватно описывает зависимость длины зоны радиовидимости RFID-элементов от их расположения относительно друг друга, можно оценить степень влияния различных факторов на протяженность этой зоны. Наиболее существенное влияние на зону радиовидимости оказывает угол наклона метки относительно горизонтальной плоскости. При изменении величины этого угла на 90° протяженность зоны радиовидимости изменяется на 20%. В связи с этим рекомендуется расположение метки относительно горизонтальной плоскости под углом, максимально приближенным к 90° , так как при таком расположении протяженность зоны радиовидимости будет наибольшей.

Остальные факторы, которые рассматривались выше как наиболее существенные по степени влияния на протяженность зоны радиовидимости, при достижении граничных значений изменяют протяженность зоны радиовидимости метки ридером в пределах 1 — 6% от величины этой протяженности в центре плана.

Литература

1. Костроминов А.М., Королев М.Ю., Гаврилов В.В., Крючкова Т.В. Применение RFID-технологий в системе автоведения поездов метрополитена // Изв. Петербургского университета путей сообщения. 2009. Вып. 3.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 276 с.
3. Бенин А.В., Гарбарук В.В. Планирование эксперимента. СПб.: ПГУПС, 2010.
4. Справочник по вероятностным расчетам / Г.Г. Абезгауз и др. М.: Воениздат, 1970. 536 с.

References

1. Kostrominov A.M., Korolev M.Ju., Gavrilov V.V., Kryuchkova T.V. Primenenie RFID – tehnologij v sisteme avtovedenija poezdov metropolitena. [Application of RFID – the technology in the system of underground automatic train operation] SPb, PGUPS: Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshchenija. 2009. Vyp. 3.
2. Adler Ju.P., Markova E.V., Granovskij Ju.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovij. [Experiment planning when searching the optimum conditions] M.: Nauka, 1976. 276 s.
3. Benin A.V., Garbaruk V.V. Planirovanie eksperimenta. [Experiment planning] Spb.: PGUPS, 2010.
4. Spravochnik po veroyatnostnym raschetam [Reference book on probability calculation] / Abezgauz G.G. i dr. M.: Voenizdat, 1970. 536 s.

УДК 656.225

Александр Эрнстович Александров, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
 Александр Владимирович Сурин, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЕЗДООБРАЗОВАНИЯ И ПОЕЗДНОЙ РАБОТЫ

Alexander E. Aleksandrov, DSc in Engineering, Professor at Management of Exploitation Work Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT, Ekaterinburg)

Alexander V. Surin, postgraduate student at Ural State University of Railway Transport (USURT, Ekaterinburg)

Simulation Models And Their Interaction In Automated End-To-End Technology For Operational Planning Of Train Formation And Train Service

Аннотация

Оперативное планирование работы — один из основных элементов оперативного управления перевозками. Современная сквозная технология планирования поездообразования и поездной работы требует автоматизации, в частности интеллектуальных прогнозных функций. Интеллектуальную прогнозную функцию должны выполнять блоки АСУ, построенные на основе математических моделей работы сортировочных станций и моделей продвижения поездов по полигону дороги. Вопросам применения математических моделей при расчете плана работы дороги посвящена данная статья.

Ключевые слова: сквозные технологии, оперативное планирование поездной работы, математические модели, имитационная модель, входной поток, выходной поток, модель продвижения поездов, оператор управления.

Abstract

Service operational planning is one of the key elements of operational carriage management. The modern end-to-end technology for planning of train formation and train service requires automation, in particular, intellectual forecast functions. The intellectual forecast function must be fulfilled by ACS units constructed on the basis of mathematical models of hump yard operation and models of train driving on the road range. This article deals with issues of mathematical model use when designing the road operation plan.

Key words: end-to-end technologies, operational planning of train service, mathematical models, simulation model, input stream, output stream, train movement model, control operator.

В статье [1] описан опыт системного анализа технологии оперативного планирования поездообразования и поездной работы железной дороги. Данный анализ представляет собой первый этап работ, необходимый для достижения конечной поставленной цели — повышения эффективности исследуемой технологии на основе создания и использования соответствующей подсистемы в АСУ ЖТ. Нормативным документом, содержащим технологические и методологические основы для проектирования комплексов задач автоматизации оперативного планирования поездной и грузовой работы, служит последняя редакция «Инструкции по оперативному планированию поездной и грузовой работы железных дорог» [2]. Основной вывод предыдущей статьи: современная сквозная технология сменно-суточного планирования поездообразования и поездной работы требует автоматизации интеллектуальных прогнозных функций. Для выполнения этой задачи эксплуатируемые в ДЦУП железных дорог информационные системы предоставляют достаточную базу данных. Интеллектуальную прогнозную функцию должны выполнять блоки АСУ, построенные на основе математических моделей работы сортировочных станций и моделей продвижения поездов по полигону дороги. Кроме того, необходима модель, выстраивающая процесс взаимодействия частных моделей при расчете плана работы всей дороги.

В работе [3] приведены результаты исследований, которые свидетельствуют о том, что для моделирования крупных железнодорожных станций и узлов предпочтительно использовать системы имитационного моделирования. На кафедре «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения под руководством лауреата Государственной премии, профессора П.А. Козлова разработана имитационная система ИСТРА. Ее теоретическая основа и наиболее важные алгоритмы изложены в работе [4]. На протяжении длительного периода времени ИСТРА интенсивно развивается и успешно применяется для моделиро-

вания крупных железнодорожных станций и узлов. Вполне логично ее использовать для моделирования работы станций при автоматизации сквозной технологии планирования поездобразования и поездной работы.

Модель полигона железной дороги представляет собой множество участков $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$. Каждый участок состоит из двух подмножеств — множества отдельных пунктов P^S и множества перегонов P^W , их соединяющих: $P_{i,i \in [1,n]} = \{P_i^S \cup P_i^W\}$.

В множество станций P^S входят отдельные пункты, имеющие путевое развитие. К ним относятся разъезды, обгонные пункты, промежуточные, грузовые, участковые и сортировочные станции. Одна станция относится только к одному участку, за исключением участковых и сортировочных станций, которые являются границами смежных участков. Станции, входящие в состав участка, имеют следующие характеристики:

- тип станции;
- количество путей на станции, предназначенных для пропуска поездов в каждом из направлений движения;
- перечень технологических операций, выполняемых на станции;
- величины станционных интервалов;
- продолжительность технологических операций.

В множество перегонов P^W входят все перегоны. Один перегон относится только к одному участку. Перегоны, входящие в состав участка, имеют следующие характеристики:

- количество путей и их специализация (перегоны могут быть однопутные, двухпутные и многопутные);
- тип средств сигнализации (полуавтоблокировка — на одном пути перегона может находиться только один поезд; автоблокировка — на одном пути перегона может находиться более одного поезда попутного направления);
- время хода по перегону в обоих направлениях для каждой категории поездопотока (пассажирский, грузовой);
- время разгона t_p и замедления t_z ;
- величина межпоездного интервала.

Входным потоком I для полигона являются поезда, поступающие на полигон по стыковым участковым станциям,

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_m.$$

Входной поток по каждому стыковому пункту можно разделить на составляющие в зависимости от работы с ним на полигоне: транзитный поток I^T и поток в разборку I^R на сортировочные станции полигона.

Выходным потоком O для полигона являются поезда, сдаваемые с полигона по стыковым участковым станциям,

$$O = O_1 + O_2 + O_3 + \dots + O_m.$$

Выходной поток по каждому стыковому пункту можно разделить на составляющие в зависимости от способа его зарождения на полигоне: транзитный поток O^T , поток, сформированный на сортировочных станциях O^S , и поток, сформированный станциями погрузки/выгрузки маршрутов или на станциях концентрации подвижного состава O^G .

Модель продвижения поездов M по железнодорожному полигону P представляет собой объединение множеств согласованных моделей F^W движения поездов по участкам, входящим в состав полигона, моделей обработки поездов на участковых F^{SU} и сортировочных F^{SS} станциях, расположенных на маршруте движения поезда,

$$M = F^W \cup F^{SU} \cup F^{SS},$$

где F^W — множество моделей движения поездов по участкам; F^{SU} — множество моделей обработки поезда на участковых станциях;

F^{SS} — множество моделей обработки поезда на сортировочной станции.

Модели из множеств F^{SU} и F^{SS} строятся при помощи ИСТРА. Далее сосредоточимся на описании модели движения поездов по участку F^W .

Оперативное планирование производится заблаговременно, поэтому при прогнозе поездной работы точно предсказать исходное поездное положение на момент расчета невозможно. Построение полностью корректного графика движения не даст точного результата по причине неточности исходных данных, имеющихся на момент расчета. На наш взгляд, для прогноза в этом случае следует строить модель, которая корректно позволит отобразить пропускную способность участка и время следования отдельных поездов по участку.

Входным потоком для модели F^W являются выходные потоки моделей F^{SU} и F^{SS} или данные из информационных систем. Элементом этого потока является поезд. Поезд как элемент входного потока для модели F^W порождает в ней цепочку операций движения его по участку.

Каждая из моделей представляет собой совокупность подмножества элементов полигона, относящихся к данному участку X_i , множества операций K_i и оператора управления Z_i .

В модели F^W элементы отличаются от элементов системы ИСТРА. Есть элементы двух типов: перегон и станция. Для этих элементов определяется максимальное количество поездов, которые на расчетном периоде могут находиться на станции или перегоне. Если в результате выполнения операции в некоторый момент времени количество поездов превысит предельно допустимое, то операция не выполняется, и формируется задержка, моделирующая простой поезда на станции. Задержка увеличивает занятость элемента, на котором находится поезд. Длительность задержки определяется в зависимости от момента невыполненного запроса на использование перегона или станции для продвижения поезда до ближайшего момента времени, когда этот запрос может быть выполнен.

Операциями являются движение поезда между двумя соседними станциями и запланированная в расписании стоянка для обработки поезда.

Операция движения поезда занимает соответствующие элементы — перегоны и станции — и имеет множество возможных длительностей выполнения (на проход, с разгоном, с замедлением, уменьшение времени хода по перегону на допустимое время нагона, увеличение времени хода по перегону на допустимое время замедления, с ограничением по скорости). В модели учитывается возможное изменение длительности выполнения операций с поездами, вызванное следующими причинами.

1. Наличие «окон» на перегоне для выполнения обслуживания или ремонта инфраструктуры перегона.
2. Наличие ограничения скорости на перегоне.
3. Наличие «окон» на станциях и стрелочных переводах, входящих в маршруты приема, отправления и проследования для выполнения обслуживания или ремонта инфраструктуры станции.

4. Наличие ограничения скорости на путях и стрелочных переводах, входящих в маршруты приема, отправления и проследования.
5. Выход из работы технических средств и устройств, влияющих на продолжительность обслуживания составов поездов.
6. Длина состава поезда больше полезной длины самого длинного пути станции.

Оператор Z_i распознает ситуацию и выбирает длительность выполнения операции. Ситуация определяется на основе уже выполненных операций и по состоянию элементов — станций и перегонов. При выполнении операции определяется время ее поступления на обслуживание. Оно равняется времени поступления поезда на участок по данным из информационных систем, из моделей F^{SU} и F^{SS} или времени окончания предыдущей операции для данного поезда в модели F^W . Оператор управления корректирует время начала выполнения операции в модели F^W . Время начала корректируется с учетом межоперационных простоев на станции, станционных и межпоездных интервалов. Станционные и межпоездные интервалы увеличивают занятость поездами соответствующих элементов. В процессе прогона модели формируется очередь, которая упорядочивается с использованием системы динамических приоритетов подобно тому, как это делается в системе ИСТРА.

Рассмотрим работу оператора управления Z_i на примере выполнения интервала неодновременного прибытия (рис. 1).

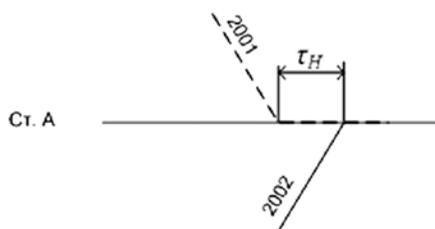


Рисунок 1 — Интервал неодновременного прибытия с остановкой встречных поездов

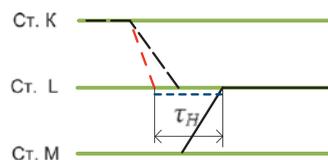
Распознавание интервала:

- направление движения поездов — встречное;
- рассчитываемая операция заканчивается остановкой;
- рассчитанная или выполненная операция заканчивается остановкой.

Ситуация 1. Момент времени окончания выполнения операции нечетного поезда на станции L $t_{1.Pr}^L$ меньше момента времени окончания выполнения операции четного поезда на станции $t_{2.Pr}^L$ и больше момента времени окончания операции четного поезда на станции $t_{2.Pr}^L$ уменьшенного на интервал неодновременного прибытия τ_H с остановкой обоих встречных поездов,

$$\begin{cases} t_{1.Pr}^L < t_{2.Pr}^L \\ t_{1.Pr}^L > (t_{2.Pr}^L - \tau_H) \end{cases}$$

Вариант решения 1. Пересчитать момент времени окончания выполнения операции $t_{1.Pr}^L$ путем уменьшения продолжительности операции на допустимое время нагона так, чтобы момент времени окончания выполнения операции на станции L удовлетворял выполнению интервала $t_{2.Pr}^L - \tau_H$ (рис. 2).

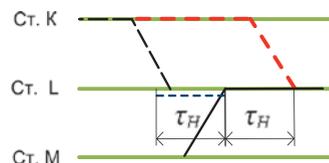


Условные обозначения

- Нитка рассчитанного поезда
- - - Нитка поезда по которому принимается решение
- - - - Вариант решения
- - - - Выполняемый интервал

Рисунок 2 — Вариант решения 1

Вариант решения 2. Изменить момент времени начала выполнения операции на станции K $t_{1.Or}^K$ так, чтобы момент времени окончания выполнения операции на станции L удовлетворял выполнению интервала $t_{2.Pr}^L + \tau_H$ (рис. 3).



Условные обозначения

- Нитка рассчитанного поезда
- - - Нитка поезда по которому принимается решение
- - - - Вариант решения
- - - - Выполняемый интервал

Рисунок 3 — Вариант решения 2

Ситуация 2. Время выполнения операции приема нечетного поезда на станцию L $t_{1.Pr}^L$ больше времени выполнения операции приема четного поезда на станцию $t_{2.Pr}^L$ и меньше времени выполнения операции приема четного поезда на станцию $t_{2.Pr}^L$ увеличенного на значение интервала τ_H неодновременного прибытия с остановкой обоих встречных поездов,

$$\begin{cases} t_{1.Pr}^L > t_{2.Pr}^L \\ t_{1.Pr}^L < (t_{2.Pr}^L + \tau_H) \end{cases}$$

Вариант решения 3. Пересчитать время выполнения операции $t_{1.Pr}^L$ путем увеличения времени хода на допустимое время замедления так, чтобы момент времени окончания выполнения операции на станции L удовлетворял выполнению интервала $t_{2.Pr}^L + \tau_H$ (рис. 4).

Вариант решения 4. Изменить момент времени начала выполнения операции на станции K $t_{1.Or}^K$ так, чтобы момент времени окончания выполнения на станции L удовлетворял выполнению интервала $t_{2.Pr}^L + \tau_H$ (рис. 5).

Согласно приведенным алгоритмам оператор управления Z_i проверяет все возможные варианты решения для каждой ситуации и выбирает тот, который минимизирует время хода поезда по участку. Этим обеспечивается необходимое качество прогноза.

При выполнении прогноза по полигону дороги модели станций и участков рассчитываются в последовательности,



Рисунок 4 — Вариант решения 3

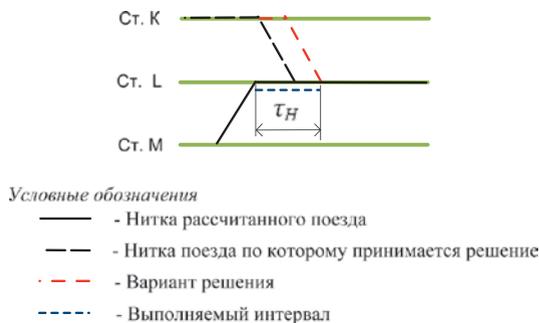


Рисунок 5 — Вариант решения 4

обеспечивающей поступление необходимых данных из одних моделей в другие. Например, вначале считаются подходы к участковым и сортировочным станциям на моделях F^W . Далее прогноз подходов, полученный на моделях F^W , используется в качестве исходных данных для расчета прогноза поездообразования в моделях F^{SU} и F^{SS} . Прогноз поездообразования на второй итерации прогона моделей F^W дополняет их исходными данными и позволяет увеличить глубину прогноза. При этом потоки с одних сортировочных и участковых станций передаются на соседние через соединяющие их участки. Таким образом формируются исходные данные для более глубокого прогноза на второй итерации прогона моделей F^{SU} и F^{SS} . Описанная последовательность продолжает работать до завершения прогноза на заданном периоде оперативного планирования.

Материал, изложенный в статье, использовался авторами в практической работе по автоматизации оперативного планирования на Свердловской железной дороге. Принципы построения моделей поездообразования, движения поездов по участкам и принципы организации взаимодействия этих моделей проверены на практике, была подтверждена их эффективность. Автоматизированный расчет дает существенно более высокую точность по контрольным временам продвижения поездов по полигону дороги. Кроме того, диспетчерский аппарат затрачивает на ручное прогнозирование более 3 ч, а автоматизированный прогноз выполняется за 15 — 20 мин. То есть выигрыш во времени примерно в 10 раз.

Литература

1. Александров А.Э., Сурин А.В. Системный анализ сквозной технологии оперативного планирования поездообразования и поездной работы // Транспорт Урала. 2011. № 4. С. 63 — 66.
2. Инструкция по оперативному планированию поездной и грузовой работы железных дорог : утв. 22.11.08.
3. Александров А.Э. Использование моделей при расчете и оптимизации систем железнодорожного транспорта. // Наука и техника транспорта. 2008. № 2. С. 54 — 56.
4. Козлов П.А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1987. 393 с.

References

1. A.E. Aleksandrov, A.V. Surin. Sistemyy analiz skvoznoy tekhnologii operativnogo planirovaniya poezdoobrazovaniya i poezdnoy raboty [System analysis of end-to-end technology for operational planning of train formation and train service] // Transport Urala. 2011. №4. P.63 – 66.
2. Instruksiya po operativnomu planirovaniyu poezdnoy i gruzovoy raboty zheleznorykh dorog, utv. [Instruction for operational planning of train and freight operation of railways, appr. on] 22 noyabrya 2008 [28 November 2008].
3. A.E. Aleksandrov. Ispolzovaniye modeley pri raschete i optimizatsii sistem zheleznodorozhnogo transporta [Using models for railway transport system design and optimization]. // Nauka i tekhnika transporta. 2008. № 2. P.54 – 56.
4. P.A. Kozlov. Teoreticheskiye osnovy, organizatsionnyye formy, metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii [Theoretical bases, organizational forms, methods for optimization of the flexible transport service technology for ironworks]: Diss. ... d-ra tehn. nauk: 05.22.12. M., 1987. 393 p.

УДК 656.221 (075)

Светлана Васильевна Богданович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация движения транспорта» Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Республика Казахстан, Болат Баделович Жардемев, доктор технических наук, генеральный директор ТОО «Научно-исследовательский центр комплексных транспортных проблем» (ТОО «НИЦ КТП»), Астана, Республика Казахстан

КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ ВЫБОРА СХЕМ ПАССАЖИРСКИХ СОСТАВОВ

Svetlana V. Bogdanovitch, PhD in Engineering, Assistant Professor at Traffic Organization Chair of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyspayev (KazATK), Almaty, Republic of Kazakhstan, Bolat B. Zhardemov – DSc in Engineering, Director General of TOO “NIC KTP” (TOO Research and Development Centre of Complex Transport Issues), Astana, Republic of Kazakhstan

Criteria For Optimal Selection Of Passenger Train Layouts

Аннотация

Установлена зависимость стоимости проезда (цены на билет) от дальности поездки и от типа вагона. За критерии выбора оптимальной схемы поезда выбраны два показателя — относительный доход и условный доход.

Исследованиями определены пороговые значения степени использования вместимости в вагонах различного типа для принятия решений по включению или исключению таких вагонов в состав поезда.

Результаты исследования заложены в программный комплекс «Оперативное регулирование схемы пассажирского поезда и оптимизация использования парка вагонов» (далее — ПК «ОРС-ПВ») (разработка ТОО «Научно-исследовательский центр комплексных транспортных проблем», Астана) для принятия управленческих решений выбора оптимальной схемы поезда исходя из прогнозных значений населенности состава поезда.

Ключевые слова: пассажиропоток, пассажирский состав, расчетная населенность состава, спрос, доходность, относительный доход, условный доход.

Abstract

Dependence of fare (ticket price) on passenger's trip distance and coach type is established. Criteria for selection of the optimal train layout are two indicators – “relative income” and “conventional income.”

The studies determined “threshold values” of the capacity utilization factor for various coach types in order to make decisions on inclusion or exclusion of such coaches into the train.

The research findings are put into the software complex “Operational control of the passenger train layout and optimizing the use of coach fleet” (hereinafter the SC “ОРСТ”) (developed by TOO Research and Development Centre of Complex Transport Issues, Astana) in order to make managerial decisions in selecting the optimal train layout based on inferred values of train occupancy.

Key words: passenger traffic, passenger train, calculated train occupancy, demand, profitability, relative income, conventional income.

Оперативное планирование и регулирование пассажирских перевозок состоит в определении наиболее рациональных моментов назначения и отмены пассажирских поездов, проведения необходимых регулировочных мероприятий с целью освоения пассажиропотока и рационального использования пассажирского подвижного состава.

В основе процесса управления пассажирскими перевозками лежит установление оптимального соотношения между потребностью населения в перевозках и имеющимся парком пассажирских вагонов в условиях непрерывного колебания пассажиропотоков с целью минимизации эксплуатационных расходов и получения необходимых доходов.

В организации курсирования конкретного маршрута и в системе функционирования пассажирского комплекса в целом, включая планирование и регулирование пассажирских перевозок, управление финансами, оптимизацию использования пассажирского вагонного парка, важнейшей информационно-аналитической составляющей являются результаты прогнозирования расчетного пассажиропотока, а в случае конкретного состава пассажирского поезда — расчетной населенности.

Величина расчетного значения населенности поезда N_c определяется по формуле

$$N_c = N_0 \pm \Delta R \pm \Delta N_c, \quad (1)$$

где N_0 — начальное прогнозное значение населенности поезда в момент отправления со станции формирования t_0 , в моменты времени прогнозирования $t = t_0 - 10$, $t = t_0 - 5$, $t = t_0 - t_{\text{спр}}$ чел.;

ΔR — разница населенности по аппроксимирующей кривой (тренду) и фактически вводимым значением, чел.;

ΔN_c — величина прогнозной ошибки населенности поезда в момент отправления t_0 (ошибка аппроксимации), чел.

При решении задачи экономического обоснования включения (или исключения) в схему состава отдельного вагона, т. е. определения оптимальной схемы состава, показателем (критерием) экономической эффективности принимаемого решения, как правило, выступает *доходность* [1, 2].

В условиях дотационного характера организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте Респу-

блики Казахстан такой подход не является приемлемым, и необходимо другое решение, основанное на иных показателях экономической эффективности.

Суть предлагаемого подхода в следующем.

По результатам анализа цен на проезд в поездах АО «Пассажирские перевозки» АО «Национальная компания «Казахстан темір жолы»» (далее — АО «ПП») получена зависимость стоимости проезда (цены на билет) от *дальности поездки* пассажира и *типа вагона*, в котором пассажир следует до станции назначения. Такое соотношение считается постоянным для всех видов сообщений (скорые, постоянные, сезонные, местного сообщения), кроме высокоскоростного (поезда № 001/002 и № 025/026).

Базовым документом, используемым при расчете стоимости на проезд в поездах всех видов сообщений (кроме высокоскоростных), является Прейскурант тарифов на проезд в пассажирских поездах (утвержден постановлением ГКЦАП РК от 24.02.95 № 1/23а), в котором представлены тарифы на проезд в зависимости от типа вагона, категории поезда, расстояния поездки. Расчеты по установлению соотношений стоимости проезда в различных типах вагонов на одинаковые расстояния и в одинаковых по категории поездах подтвердили полученную выше зависимость.

Относительный доход и условный доход

Путем анализа Прейскуранта тарифов на проезд в пассажирских поездах можно найти среднее соотношение тарифов на проезд в различных категориях вагонов во всех видах сообщений (кроме высокоскоростных поездов). При этом соотношение тарифов на проезд в вагонах различного типа на единицу расстояния можно принять за показатель относительного дохода e_i .

В выбранном подходе за условную единицу принят относительный доход купейного вагона для анализируемых видов сообщений. Далее через соотношения тарифов рассчитаны показатели относительного дохода для других типов вагонов: люкс, плацкарт и общий.

Учитывая, что фактически используемая вместимость в различных категориях вагонов различна, произведение относительного дохода и вместимости вагона дает условный доход данного типа вагона.

Условный доход вагона (по типам) в поездах определяется по формуле (сокращенно — усл. дох.)

$$D_i = B_i \cdot e_i \quad (2)$$

где B_i — вместимость вагонов i -го типа в пассажирах, чел.-место; e_i — относительный доход i -го пассажиро-места в вагоне i -го типа (сокращенно — отн. дох.).

Расчетные величины относительного дохода и условного дохода при фактически используемой вместимости вагонов различного типа представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, наибольшую условную доходность при использовании полной вместимости имеют вагоны типа люкс (39,06 усл. дох.), наименьшую — вагоны типа плацкарт (32,76 усл. дох.).

Рассмотрим вопрос о пороговом значении степени использования вместимости в вагонах различного типа для принятия решений по включению или исключению таких вагонов в состав поезда.

Таблица 1 — Соотношение условной доходности вагонов различного типа в поездах АО «ПП»

Показатель	Тип вагона			
	Люкс	Купе	Плацкарт	Общий
Вместимость (фактически используемая) B_i , чел.-место	18	36	52	81
Относительный доход от 1 пассажиро-места e_i , отн. дох.	2,17	1,0	0,63	0,42
Условный доход на 1 вагон, (при 100% населенности) D_i , усл. дох.	39,06	36,0	32,76	34,02

Известно, что колебания пассажиропотоков (сезонные, месячные, недельные и пр.), наличие переменных трафаретов для промежуточных станций на маршрутах, а также сменяемость мест в пути следования поездов предполагают наличие в поездах при отправлении определенного количества свободных мест. Количество таких мест в вагонах различного типа может быть разным и зависит от многих факторов, основным из которых является спрос пассажиров на места в вагонах определенного типа. Данный спрос определяется совокупностью трех составляющих: *дальности поездки*, *комфортности* и *цены на проезд*. Другими словами, необходимо задать рациональное значение коэффициента вместимости γ отдельного типа вагона в момент отправления поезда в рейс t_0 .

Так, проведенный анализ выявил, что спрос пассажиров на места в вагонах определенного типа зависит от месяца и сезона перевозок. На рис. 1 приведено процентное отклонение от среднего значения дохода по трем категориям вагонов — люкс, купе и плацкарт — по месяцам в течение года. При этом плацкарт свой положительный вклад в общий доход АО «ПП» приносит в сезоны зима и весна-осень (январь — май и сентябрь — декабрь), а вагоны люкс и купе — в сезон лето (июнь — август). При этом каждый тип вагона в отдельные месяцы (сезоны) при максимуме доходности имеет соответствующее значение коэффициента γ в пункте отправления поезда.

Например, для вагона плацкарт в поезде № 023Ц сообщением Алматы — Актобе в январе 2011 г. значение коэффициента γ в пункте отправления составило 0,725 (38 мест). Приняв данный показатель за порог прогнозной населенности вагона при принятии решения о включении или исключении его в состав поезда, можно построить *номограмму* в виде относительного соотношения доходности и вместимости вагонов различного типа в составе поезда (рис. 2) и определить соответствующие пороговые значения населенности для других типов вагонов. В данной номограмме линия, проведенная через точку 72,5% населенности вагона типа плацкарт, дает соответствующие пороговые значения степени использования вместимости для других типов вагонов. Значения для включения или исключения вагонов составили соответственно: для вагонов типа люкс — 61,8% (11 мест), купе — 67% (24 места), общий — 70,9% вместимости (57 мест). Результаты определения пороговых величин коэффициента γ для каждого типа вагона в разные месяцы года формируются как массив данных и в дальнейшем используются в алгоритме ПК «ОРС-ПВ».

Программный комплекс «Оперативное регулирование схемы пассажирского поезда и оптимизация использования

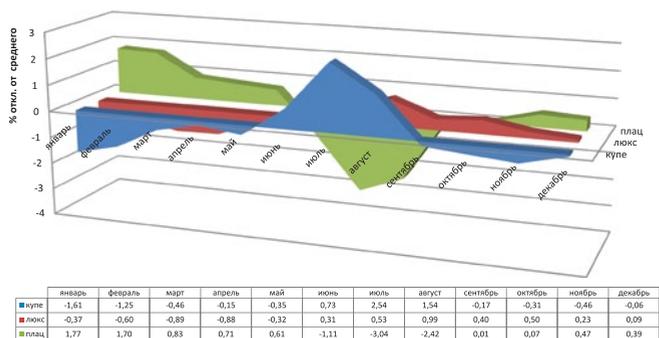


Рисунок 1 — Величина отклонения дохода от среднего значения по типам пассажирских вагонов в различные месяцы года

парка вагонов» является программным комплексом по регулированию схемы отправляемого в рейс пассажирского поезда, т. е. конечной автоматизированной системы принятия управленческих решений [3]. Система принятия решений по формированию схемы поезда ПК «ОРС-ПВ» выведена на монитор ПЭВМ оперативного работника центрального аппарата АО «ПП» по формированию схемы поезда в форме интерфейсов. Система предназначена для принятия решений по моделированию отдельного пассажирского состава в оперативном режиме на основе обработки архивно-статистической информации, находящейся в базе данных, и результатов прогнозирования расчетной населенности пассажирского состава на момент формирования и отправления пассажирского состава.

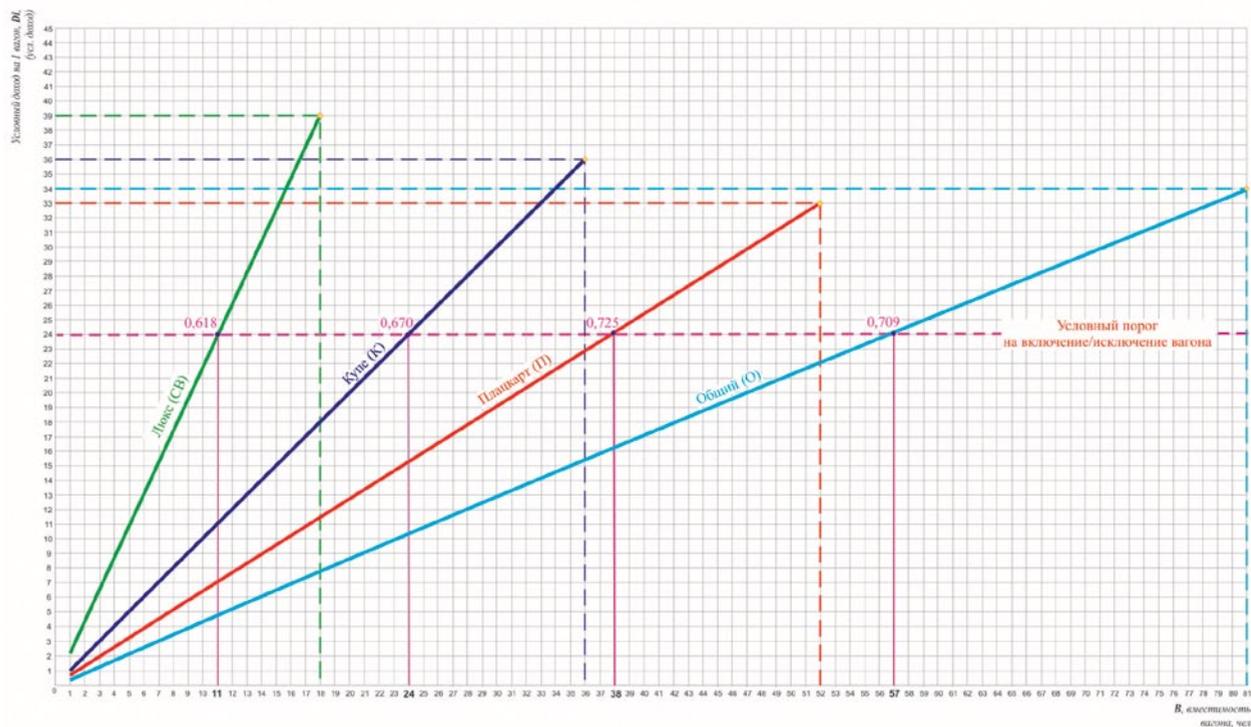


Рисунок 2 — Относительное соотношение условной доходности и вместимости вагонов различного типа (на примере поезда № 023К сообщением Алматы — Актобе в январе 2011 г.)

Литература

1. Мирошниченко О.Ф. Система управления экономическими результатами железнодорожных пассажирских перевозок. М.: МЭИ, 2002. 304 с.
2. Макарова Е.А., Елизаров С.Б., Муктепавел С.В. Автоматизированная система прогнозирования пассажирских транспортных потоков на базе «Экспресс» // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 21 — 27.
3. Оперативное регулирование схемы пассажирского поезда и оптимизация использования парка вагонов: руководство по эксплуатации программного комплекса (ПК «ОРС-ПВ»). Астана: ТОО «НИЦ КТП», 2012. 36 с.

References

1. O.F. Miroshnichenko. Sistema upravleniya ekonomicheskimi rezultatami zheleznodorozhnykh passazhirskikh perezovok [System for control over economic results of railway passenger transportation]. M.: MEI, 2002. 304 p.
2. E.A. Makarova, S.B. Elizarov, S.V. Muktepavel. Avtomatizirovannaya sistema prognozirovaniya passazhirskikh transportnykh potokov na baze "Ekspress" [Automated system for passenger traffic flow prediction based on Express] // Vestnik VNIIZhT. 2011. № 4. P. 21 – 27.
3. Operativnoye regulirovaniye skhemy passazhirskogo poezda i optimizatsiya ispolzovaniya parka vagonov [Operational control of the passenger train layout and optimizing the use of coach fleet]: Rukovodstvo po ekspluatatsii programmno kompleksa (PK "ORS-PV") [Operation manual for software complex (SC "OCPT")]. Astana: TOO "NIC KTP", 2012. 36 p.

УДК 656.13

Валерий Васильевич Петров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация и безопасность дорожного движения» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), Омск,
Александр Сергеевич Кашталинский, аспирант кафедры «Организация и безопасность дорожного движения» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), Омск

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ В ГОРОДАХ С УЧЕТОМ СТОХАСТИЧНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Valeriy V. Petrov, PhD in Engineering, Assistant Professor at Traffic Organization and Safety Chair of Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI),
Alexander S. Kashtalinsky, postgraduate student at Traffic Organization and Safety Chair of Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI)

Improving Traffic Management In Cities With Account Of Traffic Flow Stochastic Behaviour

Аннотация

Рассмотрена транспортная проблема современных мегаполисов, приводящая к увеличению транспортных задержек, количества ДТП, загазованности центральной части городов. Одним из способов организации дорожного движения, частично уменьшающим воздействие негативных явлений в транспортной системе, является использование координированного управления посредством внедрения АСУД.

Описано влияние стохастичности транспортного потока на качество его управления. Представлены результаты анализа статистических данных об интенсивности движения. Показана линейная зависимость стохастичности от величины интенсивности.

Применение представленных результатов при расчете параметров управления позволит снизить вероятность возникновения заторов на улично-дорожной сети мегаполисов.

Ключевые слова: организация дорожного движения; транспортный поток, стохастичность, интенсивность движения, автоматизированные системы управления дорожным движением.

Abstract

The article deals with the transport issue of modern megapolises leading to increased transport delays, road traffic accident rate, and gas contamination of city centres. One of the traffic management methods partially reducing the impact of negative phenomena in the transport system is the use of coordinated control by way of implementing an automated control system.

The impact of traffic flow stochastic behaviour on quality of its control is described. Results of analyzing statistical traffic intensity data are given. The linear dependence of stochastic behaviour on the intensity value is shown.

The use of provided results when calculating control parameters will allow reducing the probability of congestion on megapolis streets and roads.

Key words: traffic management; traffic flow, stochastic behaviour, traffic intensity, automated traffic control systems.

Рост автомобильного парка и объема перевозок вызывает увеличение интенсивности движения, что в городах-мегаполисах с уже сложившейся застройкой приводит к транспортным заторам. Особенно остро эта проблема проявляется в узловых пунктах улично-дорожной сети (УДС). Здесь многократно увеличиваются транспортные задержки, значительно снижается скорость транспортного потока (ТП), существенно увеличивается расход топлива, ухудшается экологическая обстановка на прилегающей территории.

Один из методов снижения негативного воздействия вышеперечисленных явлений — внедрение на сети регулируемых перекрестков УДС их координированного управления посредством автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУД). Теоретические выводы о положительном влиянии АСУД на дорожную обстановку получили практическое подтверждение по всем показателям [1].

Эффективность управления транспортным потоком на дорожно-транспортной сети города зависит от соответствия параметров управления светофорной сигнализацией характеристикам транспортных потоков. Основными параметрами управления являются длительность цикла и длительности фаз, а наиболее часто используемая характеристика транспортного потока — интенсивность движения. Анализ результатов эксплуатации более десяти АСУД в городах РФ показал, что расчет параметров управления, основанный на статистических данных за год, полученных с помощью детекторов транспорта, нередко требует значительной корректировки.

На основании изложенного была поставлена задача выявить причины такого несоответствия и найти пути его устранения.

В общепринятой методике расчета длительности цикла и фаз [2] в качестве исходных данных берутся средние значения интенсивности движения за 15 или 60 мин. В соответствии с работой [3] интенсивность движения λ можно записать следующим образом:

$$\lambda = \lambda_{det} + \lambda_{var}, \quad (1)$$

где λ_{det} — постоянная составляющая;

λ_{var} — случайная составляющая.

Д. Робертсон в работе [4] указывает, что качество управления транспортным потоком мало зависит от случайной составляющей

$\lambda_{\text{норм}}$ пока степень насыщения транспортного потока на направлении движения $X < 0,8$ ($0 \leq X \leq 1$). Величина X определяется по формуле

$$X = \frac{T}{t} \cdot \frac{\lambda}{s}, \quad (2)$$

где T — длительность цикла;

t — длительность фазы;

λ — интенсивность движения;

s — поток насыщения ($s = \text{const}$).

Д. Робертсон указывает, что роль случайной составляющей $\lambda_{\text{норм}}$ при степени насыщения $X > 0,8$ очень велика и для оценки качества управления транспортным потоком предлагает ввести случайную составляющую задержки z_V

$$z_V = \frac{1}{4} \cdot \frac{X^2}{(1-X)}, \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), случайная задержка зависит только от величины степени насыщения X . Если учесть, что в степени насыщения независимая переменная — это интенсивность движения, то величина z_V определяется также интенсивностью транспортного потока. Таким образом, случайный характер интенсивности имеет неоднозначное и значительное влияние на качество управления ТП. Случайный характер изменения интенсивности ТП принято называть стохастичностью транспортного потока [5].

Для решения поставленной задачи необходимо выполнить следующие действия:

- исследовать изменения интенсивности транспортного потока в широком диапазоне;
- установить значимость и характер стохастичности в зависимости от величины интенсивности транспортного потока;
- установить связь стохастичности со степенью насыщения.

На первом шаге решения задачи был выполнен анализ статистических данных изменения интенсивности транспортного потока, полученных с помощью детекторов транспорта. Данные собраны в течение месяца непрерывного измерения (с 1 по 27 ноября 2007 г.) на двухполосном направлении движения ул. Фрунзе в Омске. Состав ТП: 85% — легковые автомобили, 15% — грузовые и автобусы. Интенсивность ТП изменялась от 0 до 800 автомобилей в час на полосу. Период усреднения данных составлял 5 мин.

В результате обработки данных были получены аппроксимирующие зависимости относительного показателя $\lambda_{\text{о}}$ и абсолютного показателя $\lambda_{\text{а}}$ разброса интенсивности ТП от средней величины интенсивности:

$$\lambda_{\text{о}} = 37,521 - 0,035\lambda; \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{а}} = 24,875 + 0,131\lambda, \quad (5)$$

где λ — среднее значение интенсивности ТП.

На рис. 1 и 2 представлены графические иллюстрации зависимостей (4) и (5) соответственно.

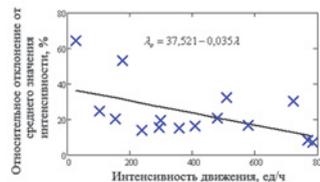


Рисунок 1 — Зависимость относительного отклонения интенсивности движения от ее среднего значения

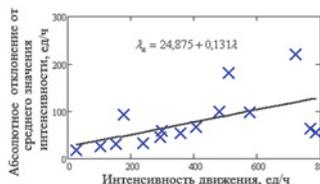


Рисунок 2 — Зависимость абсолютного отклонения интенсивности движения от ее среднего значения

Как видно из уравнения (4), с ростом интенсивности транспортного потока изменяется величина разброса $\lambda_{\text{о}}$, а при средних значениях ($300 \leq \lambda \leq 600$) разброс может составлять около 20%. Если перейти к абсолютным значениям (в соответствии с выражением (5)), то при $\lambda = 600$ авт/ч $\lambda_{\text{а}}$ превысит более 100 авт/ч., что приведет к затору, так как величина X вместо 0,8 составит 0,95 в соответствии с выражением (2).

Учет стохастичности ТП при совершенствовании организации движения посредством расчета параметров управления в составе АСУД с поправкой на стохастичность в соответствии с (5) позволил сократить вероятность возникновения заторовых ситуаций в Красноярске, Воронеже, Белгороде в среднем на 15%.

Литература

1. Петров В.В. Управление движением транспортных потоков в городах: монография. Омск: Изд. СибАДИ, 2007. 92 с.
2. Руководство по регулированию дорожного движения в городах. М.: Стройиздат, 1974. 96 с.
3. Печерский М.П., Хорович Б.Г. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах. М.: Транспорт, 1979. 176 с.
4. Robertson D. Transit method for area traffic control // Traffic Engineering & Control. 1969. № 11. С. 6.
5. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения: учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 279 с.

References

1. V.V. Petrov. Upravleniye dvizheniyem transportnykh potokov v gorodakh [Urban traffic flow management]: Monograph. Omsk: Izd. SibADI, 2007. 92 p.
2. Rukovodstvo po regulirovaniyu dorozhnogo dvizheniya v gorodakh [Urban traffic management manual]. M.: Stroyizdat, 1974. 96 p.
3. M.P. Pechersky, B.G. Horovitch. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniyem v gorodakh [Automated urban traffic management systems]. M.: Transport, 1979. 176 p.
4. Robertson D. Transit method for area traffic control // Traffic Engineering & Control. 1969. №11. P. 6.
5. Yu.A. Kremenets, M.P. Pechersky, M.B. Afanasyev. Tekhnicheskiye sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya [Traffic management facilities]: Ucheb. dlya vuzov [Study Guide for Universities]. M.: IKC Akademkniga, 2005. 279 p.

УДК 625.113

Геннадий Львович Аккерман, доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Айдар Рафатович Исламов, ассистент кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА ЧЕРЕЗ ПЕРЕЛОМЫ СМЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ИМИТАЦИОННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Gennady L. Akkerman, DSc in Engineering, Professor, Railway Construction and Railway Track Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT),
Aidar R. Islamov, Assistant at Railway Construction and Railway Track Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT)

Studying Power Parameters Of Train Movement Via Breaks In Adjacent Elements Of Grade By Simulation Modelling

Аннотация

В статье показаны результаты исследований силовых параметров процесса движения поезда через переломы смежных элементов продольного профиля, доказывающие возможность при проектировании профиля использовать имитационное моделирование.

Применение вертикальных кривых при любых сочетаниях сопряжения элементов продольного профиля ведет к уменьшению шумов ускорений, а следовательно, к уменьшению затрат.

Ключевые слова: тяжеловесные поезда, нормы проектирования, уклон, перелом продольного профиля, алгебраическая разность смежных элементов, радиус вертикальной кривой, имитационное моделирование, продольные усилия в автосцепке, вертикальное ускорение экипажа, шум ускорения.

Abstract

The article gives results of studying power parameters of train movement via breaks in adjacent elements of grade, proving the suitability of simulation modelling during profile design.

Using vertical curves at any combinations of grade element adjacency combinations leads to reduction of acceleration noises and, consequently, to cost reduction.

Key words: heavy trains; design standards; slope; break in grade; algebraic difference of adjacent elements; vertical curve radius; simulation modelling; longitudinal forces in automatic coupling; carriage vertical acceleration; acceleration noise.

Движение поезда представляет собой сложную механическую систему, в которой возникают динамические процессы, обусловленные изменением тяговых усилий локомотивов, профилем пути и торможением. По условиям образования и изменения продольных усилий различают два основных режима ведения поезда: установившийся, или стационарный, и неустановившийся, или переходный, при котором система в малые промежутки времени переходит из одного состояния в другое. При этом усилия, возникающие в автосцепке, имеют наибольшие по модулю значения [1].

В настоящее время тяжеловесные длиннооставные поезда движутся по продольным профилям железнодорожного пути, сопряжение смежных элементов которых не отвечает существующим нормативным требованиям [2 — 4], а ограничивающие значения перелома профиля даются в зависимости от его местоположения, категории пути и полезной длины приемоотправочных путей. При этом если алгебраическая разность $\Delta i \geq 2,3 - 5,2^{0/00}$ в зависимости от категории железнодорожной линии, то смежные элементы профиля в вертикальной плоскости сопрягаются кривой. Геометрия продольного профиля в этом случае в местах его перелома представлена в виде многоугольника со стороной l ($\min l = 25$ м — длина рельса), описываемого вокруг круговой кривой, имеющей прямой профиль, если l не менее сотни метров, и криволинейный профиль, если l — десятки метров.

Радиус вертикальной кривой (R_b) можно представить из выражения

$$a_b = \frac{V^2}{R_b} \quad (1)$$

при допустимых условиях плавности движения поезда $[a_b] \leq 0,1 - 0,2$ м/с²

$$R_b = \frac{V^2}{[a_b]} \quad (2)$$

где a_b — центробежное ускорение, возникающее при движении по вертикальной кривой.

Из выражения (2) R_b задается в зависимости от скорости движения $f(V)$, т. е. его можно принимать при проектировании не по нормам, а по расчетам. Отсюда на переломах продольного профиля проектируемой линии можно и нужно в расчетах варьировать параметрами Δi и R_b , при этом критериями будут (условно):

- плавность $a_b \leq [a_b]$, $\frac{da_{ав}}{dt} \leq \frac{da_{ав}}{dt}$, где $a_{ав}$ — продольное ускорение в автосцепке; шум продольных ускорений $\mu_a = \sqrt{\frac{\sum (a_{ав} - a_{ав.ср})^2 dt}{T}}$, где $a_{ав.ср}$ — среднее продольное ускорение экипажа; T — время следования поезда по заданному участку;
 - безопасность $S \leq [N]$ или $a_{ав} \leq [a_{ав}]$,
- т. е. важна не только сила, но и ее изменение [5].

На сегодняшний день исследования силового воздействия экипажа на путь и его изменения можно производить посредством имитационного моделирования [6].

В качестве инструмента для проведения имитационного моделирования среди множества компьютерных продуктов был выбран программный комплекс «Универсальный механизм» (УМ), разработанный Брянским государственным техническим университетом под руководством профессора Д.Ю. Погорелова [7].

Результаты вариантного имитационного моделирования показывают следующее.

1. На всех участках продольного профиля с переломами, отличными от нормативных по СТН Ц 01-95, силы, действующие на автосцепку при движении поезда по вертикальной кривой, не превышают допустимых значений (≈ 1200 кН) независимо от величин перелома продольного профиля (рис. 1).

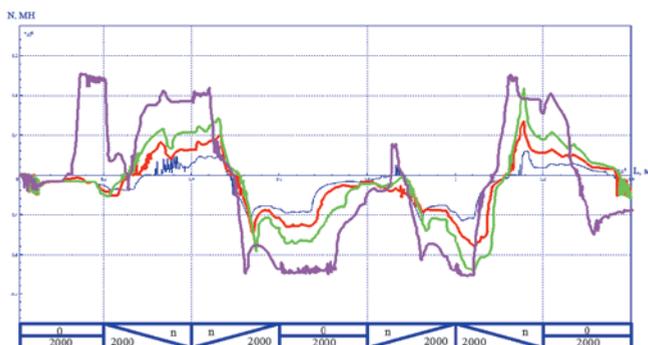


Рисунок 1 — График изменения продольных усилий между локомотивом и первым вагоном тяжеловесного поезда 1,5ВЛ80С, 72 полувагона, $q = 21,0$ т/ось, длина поезда $l_p = 1000$ м, вес поезда $Q = 6340$ т:

- при движении по участку пути с уклонами 3‰ ;
- при движении по участку пути с уклонами 6‰ ;
- при движении по участку пути с уклонами 9‰ ;
- при движении по участку пути с уклонами 15‰

2. Независимо от величины алгебраической разности смежных элементов при движении поезда по вертикальной кривой, радиус которой определен по формуле (2), значения центробежного вертикального ускорения остаются в пределах допустимых значений $[a_b]$. К примеру, на продольном профиле с переломами 20 и 40‰ при движении тяжеловесного поезда 1,5ВЛ80С (72 полувагона с осевой нагрузкой $q = 21,0$ т/ось, длина поезда $l_p = 1000$ м, вес поезда $Q = 6340$ т, максимальная скорость на участке $V_{\max} = 80$ км/ч) вертикальные ускорения 35-го вагона не превышают $1,2$ м/с² (рис. 2).

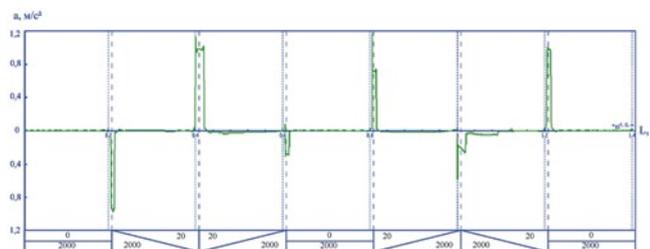


Рисунок 2 — График изменения вертикальных ускорений

3. Значения вертикальных ускорений экипажа при движении поезда по вертикальным кривым значительно ниже, чем при движении по переломам без устройства вертикальных кривых (рис. 3).

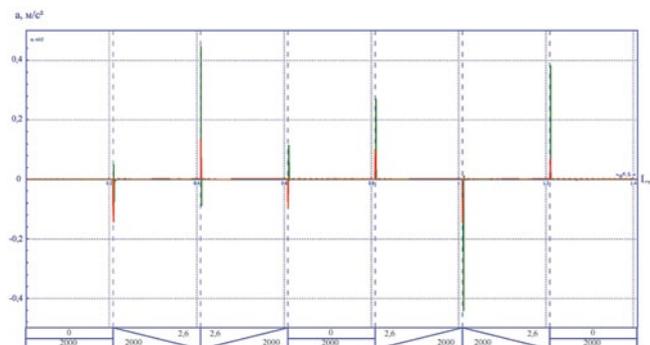


Рисунок 3 — Графики изменения вертикальных ускорений:
 — вертикальные ускорения вагона при движении по переломам продольного профиля с устройством вертикальных кривых;
 — вертикальные ускорения вагона при движении по переломам продольного профиля без устройства вертикальных кривых

4. Шум горизонтальных (в автосцепках) ускорений в первую очередь зависит от веса, скорости и режима ведения поезда, во вторую — от величины перелома продольного профиля, влияющей на длину вертикальной кривой. Разница шума продольных ускорений поездов разного веса может достигать 50% (рис. 4).

5. С увеличением перелома профиля скорость поезда на выходе остается больше, чем при меньших переломах, так как поезд начинает раньше входить в вертикальную кривую при больших переломах и преодолевает меньшие высоты.

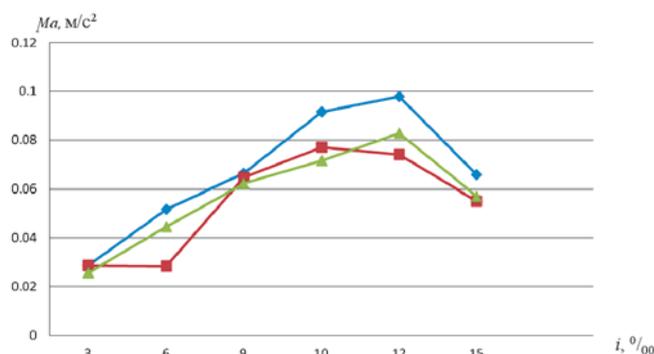


Рисунок 4 — Графики изменения шума продольных ускорений, возникающих в автосцепке между локомотивом и первым вагоном в зависимости от перелома продольного профиля и веса поезда:

— состав поезда весом 4032 т; — состав поезда весом 6048 т; — состав поезда весом 9000 т

Учитывая вышеизложенное, не исключается применение увеличенных переломов, рассчитанных посредством имитационного моделирования, а следовательно, требования допустимых норм Δi и l при проектировании профиля не могут считаться обязательными.

Для проектируемой (реконструируемой) железнодорожной линии с учетом конкретной ситуации должны быть созданы свои объективные нормы. При этом результаты, полученные применением имитационного моделирования, доказывают, что с уменьшением вертикальных ускорений, возникающих в составе поезда, уменьшаются продольные ускорения, что обеспечивает более плавное движение поезда, а это, в свою очередь, уменьшает затраты энергии на тягу поезда.

Литература

1. Лазарян В.А., Блохин Е.П. О математическом моделировании движения поезда по переломам продольного профиля пути : сборник науч. тр. / Моск. ин-т инж. ж.-д. трансп. М., 1974. С. 83 — 123.
2. СНиП 32-01-95. Железные дороги колеи 1520 мм. М., 1995.
3. СТН Ц 01-95. Железные дороги колеи 1520 мм. М. : МПС, 1995.
4. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути. М., 2012.
5. Аккерман Г.Л., Аккерман С.Г. Требования к величинам переломов профиля // Путь и железнодорожное строительство : сборник науч. тр. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2008. С. 5 — 8.
6. Исламов А.Р. Имитационное моделирование движения поезда по сопряженным элементам продольного профиля // Вестник УрГУПС. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. № 4 (12). С. 77 — 82.
7. Универсальный механизм: официальный сайт программного продукта UM [Электронный ресурс]. URL: <http://www.umlub.ru> (дата обращения 20.06.2012)

References

1. V.A. Lazaryan, E.P. Blohin. O matematicheskom modelirovanii dvizheniya poezda po perelomam prodolnogo profilya puti [On mathematical modelling of train movement via breaks in grade]: sb. nauch. tr./ Mosc. in-t inzh. zh.-d. transp. M.: 1974. P. 83 – 123.
2. SNiP 32-01-95. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm [1520 mm gauge railroads]. M., 1995.
3. STN C 01-95. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm [1520 mm gauge railroads]. M.: MPS, 1995.
4. Tekhnicheskiye usloviya na raboty po rekonstruktsii (modernizatsii) i remontu zheleznodorozhnogo puti [Specifications for railway track renovation (upgrade) and repair]. M., 2012.
5. G.L. Akkerman, S.G. Akkerman. Trebovaniya k velichinam perelomov profilya [Requirements to values of breaks in profile] // Put i zheleznodorozhnoye stroitelstvo: sb. nauch. tr. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2008. p. 5–8.
6. A.R. Islamov. Imitatsionnoye dvizheniye poezda po sopryazhennym elementam prodolnogo profilya [Simulation modelling of train movement via adjacent elements of grade] // Vestnik UrGUPS. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2011. № 4 (12). P. 77-82. ISSN 2079-0392
7. Universalny mekhanizm [Universal mechanism]: ofitsialnyy sait programmnogo produkta "UM" [official website of UM software product]. URL: <http://www.umlub.ru> (date of calling 20.06.2012).

УДК 681.3:625.1 73

Максим Константинович Дуплякин, аспирант кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Сергей Викторович Сизый, доктор технических наук, доцент кафедры алгебры и дискретной математики Уральского федерального университета (УрФУ), Екатеринбург,
Василий Михайлович Сай, доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕМОНТНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ПУТЕВЫХ МАШИН

Maxim K. Duplyakin, postgraduate student; Railway Construction and Railway Track Chair of Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia.

Sergey V. Sizy, DSc in Engineering, Assistant Professor; Algebra and Discrete Mathematics Chair of Ural Federal University; Ekaterinburg, Russia,

Vasily M. Say, DSc in Engineering, Professor; Railway Construction and Railway Track Chair of Ural State University of Railway Transport; Ekaterinburg, Russia

Modelling Processes Of Construction And Repair Works With Account Of Track Machine Reliability

Аннотация

Предложена графоаналитическая модель организации технологического процесса ремонта железнодорожного пути с учетом случайных отказов ремонтно-строительных машин в процессе производства работ в «окно».

Для прогнозирования отказов путевых машин во время реализации технологических процессов разработана математическая модель, позволяющая учитывать возникновение случайных отказов. Математическая модель основана на теории надежности и марковских процессах. При этом все отказы считаются невосстанавливаемыми с независимыми элементами.

Предложен алгоритм проведения имитационной экспертизы, включающий моделирование технологического процесса; прогнозирование работы (отказов) путевых машин, разработку экономико-математических моделей технологического процесса ремонта пути, проигрывание на математической модели производственных сценариев, анализ и принятие решения по корректировке организации работы при реализации технологического процесса.

Ключевые слова: моделирование процесса ремонта пути, имитационная экспертиза, вероятность безотказной работы, случайные отказы, прогнозирование отказов.

В результате проводимых в ОАО «РЖД» реформ все ранее входившие в состав компании ремонтно-строительные и производственные подразделения выведены из ее организационной структуры и преобразованы в хозяйствующие субъекты со статусом дочернего или зависимого общества.

Одновременно с этим процессом на рынке товаров и услуг появились фирмы, способные оказывать услуги по строительству, ремонту и содержанию инфраструктуры со статусом независимых хозяйствующих субъектов [1 — 3].

В результате таких перемен «инфраструктура и хозяйствующие субъекты, поставляющие продукцию и оказывающие услуги, оказались в разных организационно-правовых полях» [4].

Abstract

A grapho-analytical model for organization of railway track repair is offered with account of random failures of repair and construction machines during the “gap” and is represented by a process flow diagram, algorithm for determination of work commencement and completion, network graph of the track repair process.

To forecast track machine failures during process implementation, a mathematical model allowing the account of random failures was developed. The mathematical model is based on reliability theory and Markovian processes. Thereat, all failures are considered non-recoverable with independent elements.

An algorithm of simulation examination is offered, including the process modelling; forecast of track machine operation (failures); development of an economic and mathematical model of the track repair process; enactment of production scenarios on the mathematical model; analysis and decision-making in correction of work management during process implementation.

Key words: track repair process modelling, simulation examination, fail-safe operation probability, random failures, failure forecasting.

При выполнении ремонтно-строительных работ на транспортной инфраструктуре ОАО «РЖД», как правило, необходимо «окна» в графике движения поездов, что существенно влияет на эффективность перевозочного процесса. Поэтому при заключении контрактов между заказчиком и исполнителем особое внимание необходимо уделять эффективности использования «окон». Появляется такое понятие, как платность за предоставление или непредоставление «окна» [5].

Технологический процесс ремонтно-строительных работ представляет собой упорядоченный, технологически увязанный комплекс машин и механизмов. При производстве работ

зачастую отдельные машины могут выйти из строя (отказ, поломка), что приводит к прекращению работ в «окно».

Таким образом, возникает необходимость научного предвидения (обоснования) отказов работы ремонтно-строительной техники в «окно» и потребность проектировать технологические процессы и график предоставления «окон» на основе такого предвидения.

В результате анализа существующих методик разработки технологических процессов комплекса путевых работ установлено, что в настоящее время расчет выполняется по методике поточного ведения работ, изложенной в [6]. В этой методике основным параметром для проектирования технологического процесса является длина фронта работ в «окно» $L_{фр}$

$$L_{фр} = q \cdot n, \quad (1)$$

где q — ежедневная производительность путевой машинной станции (ПМС);

n — частота предоставления «окон» для выполнения основных работ, т. е. число рабочих дней, в течение которых «окно» предоставляется один раз.

Основным недостатком формулы (1) является то, что в ней не заложена продолжительность «окна» $T_{окв}$ в то время как Дорожный центр управления перевозками (ДЦУП) планирует в графике движения поездов время, отведенное для выполнения работ в «окно», под которое разрабатывается технологический процесс [7]. Еще одним недостатком упомянутой методики является то, что при расчете суточной производительности ПМС q используют параметр резерва времени $\sum t$, который учитывает функциональные сбои во время технологического процесса [8]. Этот параметр выведен эмпирическим путем и не может полностью отражать надежность путевых машин, организационные особенности и текущие условия производства работ:

$$q = \frac{Q}{(T - \sum [t])}, \quad (2)$$

где Q — годовой план ремонта ПМС, км;

T — продолжительность ремонтного сезона, сут;

$\sum t$ — резерв времени, учитывающий отмену «окон», перебои в обеспечении материалами верхнего строения пути, отказы путевых машин, локомотивов, технологические отказы, сут [6].

Научно обосновать количественную оценку параметра $\sum t$ можно, лишь применив имитационную экспертизу проекта.

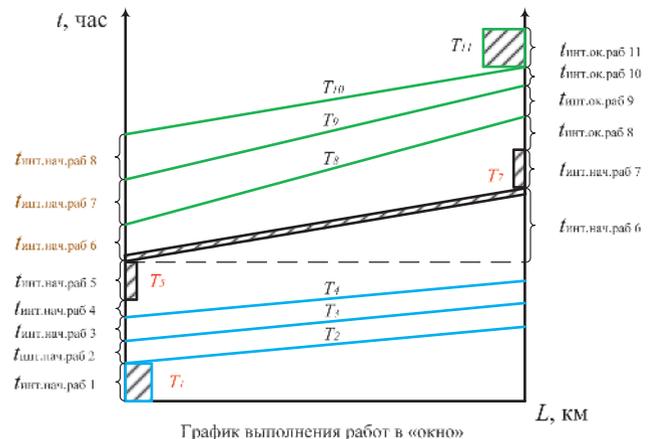
Имитационная экспертиза — системное исследование с помощью экспериментов на модели, позволяющее получить полную характеристику объекта как системы, а также характеристику ее отдельных элементов и их взаимодействия: спрогнозировать при выполнении технологических операций возникновение отказов. Имитационная экспертиза представляет собой экономико-математическую модель, подробно отображающую структуру и технологию работы объекта, позволяющую проводить эксперименты в условиях, близких к реальности, и получить необходимые для оценки проекта параметры [9].

Графоаналитическая модель организации технологического процесса в настоящей статье представлена:

- схемой технологического процесса (рис. 1);
- алгоритмом определения времени начала и окончания работ технологического процесса ремонта пути (рис. 2);
- сетевым графом технологического процесса ремонта пути (рис. 3).

Для технологических процессов летних путевых работ имитационная экспертиза включает:

- моделирование технологического процесса (увязка путевых работ и подбор машин);
- анализ и прогнозирование работы (отказов) путевых машин, участвующих в реализации технологического процесса;
- разработку экономико-математических моделей технологического процесса ремонта пути;
- проигрывание на математической модели сценариев реализации технологического процесса;
- анализ и принятие решения по корректировке организации работы при реализации технологического процесса.



Условные обозначения:

$t_{\text{нач.нач.раб } (n)}$ — интервал между началами работ, мин;

$t_{\text{инт.ок.раб } (n)}$ — интервал между окончаниями работ, мин;

$T_{(n)}$ — продолжительность операции, мин.

Рисунок 1 — Схема технологического процесса

Алгоритм проведения имитационной экспертизы технологического процесса ремонта пути представлен на рис. 4.

При проведении имитационной экспертизы одной из основных и самой сложной частью работы является прогнозирование работы (прогнозирование отказов) путевых машин, участвующих в реализации технологического процесса.

Для прогнозирования отказов путевых машин во время реализации технологических процессов разработана математическая модель, позволяющая учитывать возникновение случайных отказов. Математическая модель основана на теории надежности и марковских процессах [10]. При этом все отказы считаются невозстанавливаемыми с независимыми элементами [11 — 13].

Для разработки математической модели прогнозирования работы (отказов) путевых машин, участвующих в реализации технологического процесса, предложена расчетная схема, предусматривающая, что путевая машина представлена в виде системы, включающей восемь независимых, упорядоченных основных узлов, состоящих из блоков и элементов. Таким образом, прогнозирование работы (отказов) путевых машин ведется на уровне элементов, которые и являются первопричиной возникновения отказа путевой машины [14].

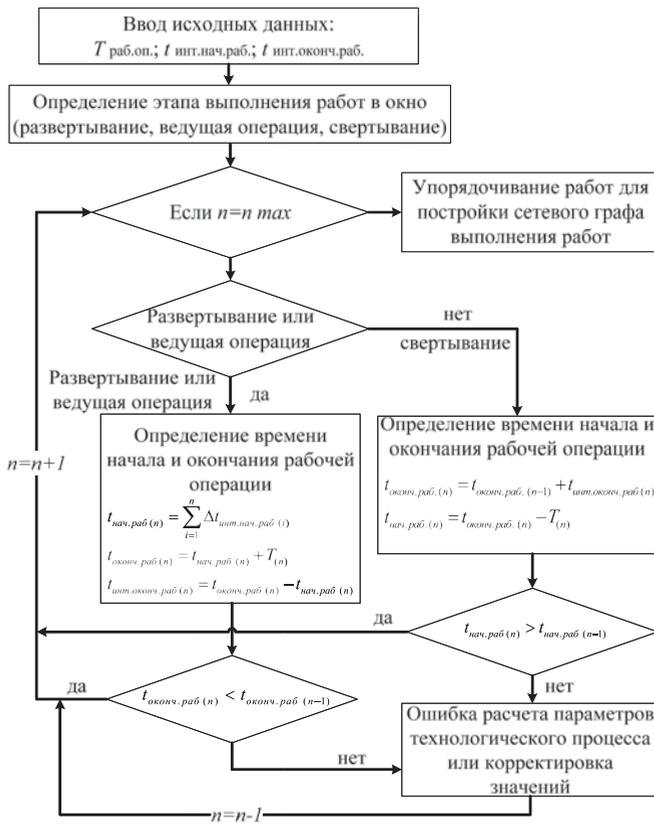


Рисунок 2 — Алгоритм определения времени начала и окончания работ технологического процесса ремонта пути

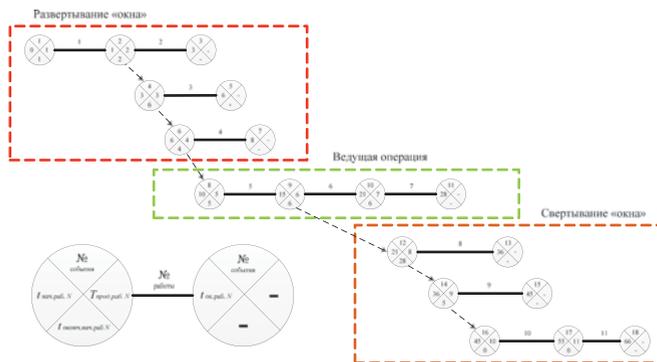


Рисунок 3 — Сетевой граф технологического процесса ремонта пути

Надежность путевых машин (прогнозирование их отказов) можно определять двояко:

- на основе статического подхода (использование статистической информации об отказах в процессе работы отдельных элементов машины как системы);
- на основе динамического подхода (моделирование в процессе эксплуатации машины износа/старения элементов, узлов и машины в целом и прогнозирование отказов).

В настоящей работе прогнозирование отказов путевых машин основано на обработке статистической информации

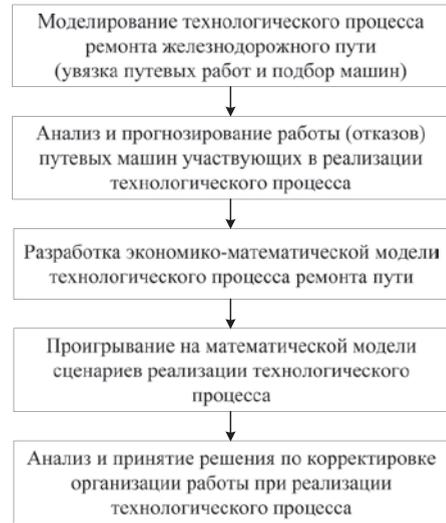


Рисунок 4 — Алгоритм проведения имитационной экспертизы технологического процесса ремонта пути

об отказах в период ведения летних путевых работ в «окна» с учетом начального состояния машины и износа ее элементов в процессе производства работ.

На примере машины Duomatic для идентификации узла, блока и элемента, в котором произойдет отказ, а также определения индикативного времени восстановления отказа разработана блок-схема основных узлов машины (рис. 5).

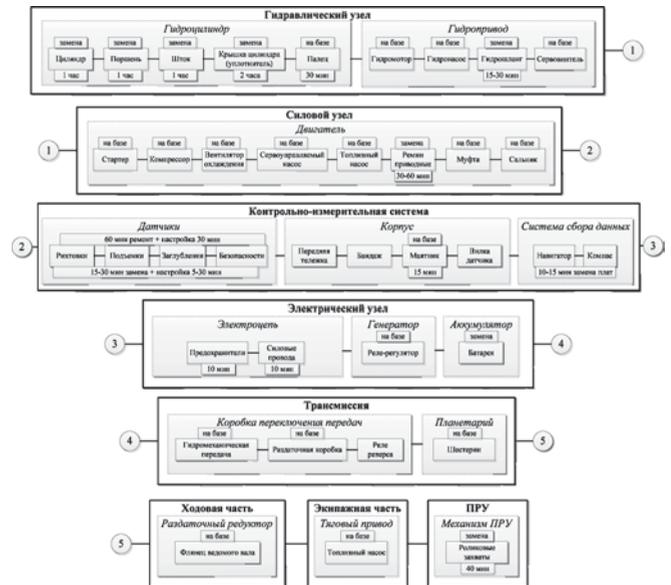


Рисунок 5 — Блок-схема основных узлов путевой машины Duomatic

В табл. 1 представлена (для некоторых элементов путевой машины Duomatic) статистика отказов за 2011 г. Обработка статистических данных выполнена с использованием метода анализа видов и последствий отказов (АВПО), позволяющего идентифицировать принадлежность элемента, вышедшего из строя, к блоку и узлу, выявить причину отказа [15].

Таблица 1 — Отказы некоторых узлов путевой машины Duomatic за 2011 г.

Составляющие системы	Наработка по месяцам, ч						
	Апрель 106,5	Май 68,5	Июнь 67,5	Июль 82,6	Август 79,9	Сентябрь 102,5	Октябрь 82,9
Гидравлический узел	1	4			1		
Гидроцилиндр (блок)							1
Цилиндр (элемент)	1	2			1		
Шток (элемент)		2					
Силовая часть (узел)		1		3		2	
Двигатель (блок)		1					
Стартер (элемент)		1		3		2	

На основании наблюдения видим, что отказы представляют собой «редкие события», поэтому зададимся гипотезой, что отказы элементов, блоков, узлов и машины в целом как случайные события распределены по экспоненциальному закону [16].

Тогда:

$$T_o = \sum_{i=1}^k t_i \cdot \omega_i \text{ — средняя наработка на отказ;}$$

$$\lambda = \frac{1}{T_o} \text{ — интенсивность отказа элемента;}$$

$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$ — теоретическая плотность показательного закона распределения отказов;

$P(t) = e^{-\lambda t}$; $Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ — функции надежности и распределения отказов элемента.

На рис. 6 представлены результаты обработки статистических данных в зависимости от времени наработки гидравлического узла путевой машины Duomatic: гистограмма отказов и функция надежности $P(t)$. Рис. 6 подтверждает обоснованность применения экспоненциального закона распределения отказов.

Для построения математической модели прогнозирования отказов путевой машины для каждого ее элемента определен закон распределения интенсивности отказов $\lambda(t)$.

Количественной мерой возникновения отказа как случайного события является его вероятность. Отказ элемента путевой машины — событие независимое, исходя из того что появление одного события не изменяет вероятность появления другого [13, 16].

Алгоритм моделирования случайных отказов путевых машин состоит из трех этапов.

Этап 1. Формирование исходной информации: λ — интенсивность отказа; τ — время наработки узла, ч; Δt — шаг моделирования, ч; $T_{маш}$ — время работы машины в «окно», ч.

Этап 2. Вычисление вероятности безотказной работы элемента $P(t_i)$

$$P(t_i) = e^{-\lambda(\tau + \sum_{j=1}^i \Delta t)} \quad (3)$$

Этап 3. Прогнозирование случайного отказа в момент моделирования t_i с заданной вероятностью безотказной работы элемента $P(t_i)$.

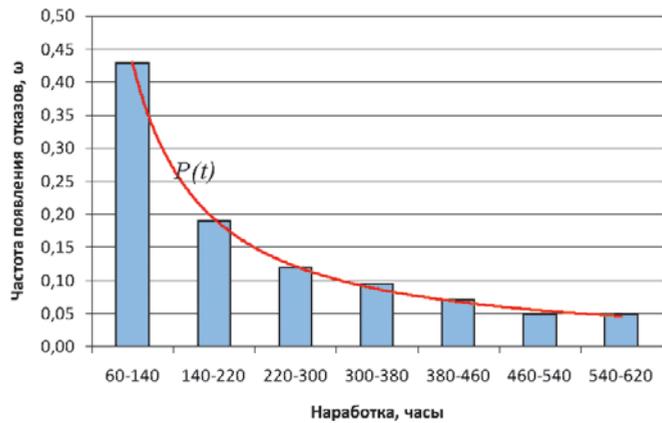


Рисунок 6 — Гистограмма частот появления отказов

Ниже приведен фрагмент матрицы состояния элемента M размерностью 100×100 , отражающей вероятность его безотказной работы. В матрице состояние, при котором может быть отказ путевой машины, обозначено 1, безотказная работа обозначена 0.

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Для заполнения матрицы неработоспособными состояниями (т. е. единицами) необходимо прогнозировать возможные отказы работы путевых машин. Например, $P(t) = 0,920$ и $Q(t) = 0,08$ означает, что на 10000 испытаний в матрице будет 9200 равномерно распределенных ячеек с нулевым значением. При этом произойдет 800 отказов, которые равномерно распределяются по квадратному полю матрицы с использованием датчика случайных чисел с равномерным законом распределения.

Для того чтобы избежать эффекта систематической концентрации единиц в некоторой выделенной области квадратной матрицы¹ (а следовательно, возникновения систематической ошибки экспериментов), при многократных проведениях экспериментов на больших матрицах следует использовать датчики случайных чисел, выдающие два равномерных распределения случайных чисел [17]. Датчиком случайных чисел, удовлетворяющим поставленному требованию, является, например, генератор случайных чисел компании Microsoft из инструментария для разработки криптографических программ (Microsoft Crypto API). Согласно обзорам компании Microsoft, указанный генератор производит даже

1 Поясним на простом примере эффект, которого следует избегать при проведении экспериментов. Рассмотрим вполне «равномерную» последовательность из нулей и единиц 001001001, сгенерированную датчиком случайных чисел. В этой последовательности вероятность появления 1 (отказа) равна $p = 1/3$. Если составим из этой последовательности матрицу состояния элемента машины (размера 3×3), то получим матрицу, в которой два первых столбика заполнены нулями, а последний столбик целиком состоит из единиц. Ясно, что в такой матрице единицы уже неравномерно распределены по квадратному полю.

n -распределенные случайные числа ($n > 2$), т. е. случайные числа «лучшего качества», чем получаемые от генераторов случайных чисел из стандартной библиотеки языка C++ (или иных стандартных языков программирования), на которых пишутся прикладные пользовательские системы и, следовательно, непригодных для решения рассматриваемой здесь задачи [18].

На основании сформированной матрицы происходит случайный выбор ячейки, состояние которой и определяет с заданной вероятностью надежности вывода, будет ли элемент путевой машины работать безотказно или произойдет сбой в его работе.

Так как прогнозирование работы (отказов) путевых машин ведется на уровне элементов (как оговорено выше), то состояние машины в целом будем оценивать по состоянию ее элементов.

Для прогнозирования возникновения отказов с заданной вероятностью надежности вывода элементов системы и машины в целом разработан алгоритм (рис. 7).

Представленный алгоритм реализован в объектно-ориентированной программе «Моделирование возникновения случайных отказов ремонтно-строительных машин»¹ (рис. 8).

Программа позволяет прогнозировать возникновение случайных отказов элементов машин, определять время возможного возникновения отказа, вероятность, с которой он может возникнуть, идентифицировать узел и блок, в котором произойдет отказ.

Результаты расчетов могут использоваться при проектировании технологических процессов ремонтов пути и организации летних путевых работ.

Для моделирования влияния отказов элементов путевой машины на выполнение технологического процесса разработана схема развития отказов (рис. 9). В ней отражены возможные последствия реализации технологического процесса при возникновении отказа элемента путевой машины.

Совместное использование приведенной схемы (см. рис. 9), блок-схемы основных узлов путевой машины (см. рис. 5) и результатов моделирования отказов элементов машины позволяет с заданной вероятностью надежности вывода определить выполнение заданного объема путевых работ в выделенное «окно» или вероятное время задержки «окна».

Надежность реализации технологического процесса необходимо определять с учетом надежности всего последовательно упорядоченного комплекса путевых машин.

Итак, основными параметрами имитационной экспертизы являются вероятность выполнения заданного объема путевых работ в выделенное «окно» и вероятное время задержки «окна» при условии выполнения всего заданного объема работ.

Имитационная экспертиза технологического процесса позволяет с учетом надежности путевых машин прогнозировать его выполнение в «окно», а также определить параметры для принятия обоснованного управленческого решения при организации летних путевых работ.



Рисунок 7 — Алгоритм моделирования отказов путевых машин

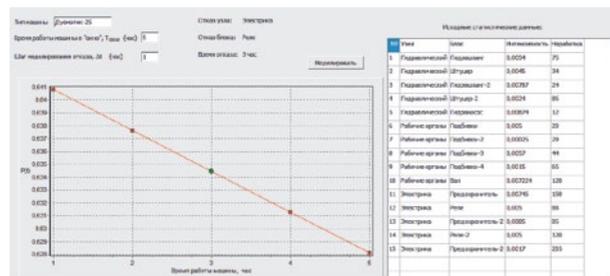


Рисунок 8 — Интерфейс программы «Моделирование возникновения случайных отказов ремонтно-строительных машин»



Рисунок 9 — Схема развития отказа и его влияния на реализацию технологического процесса

¹ Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2012614737.

Литература

1. Сай В.М. Планетарная структура: корпоративные варианты // Мир транспорта. 2003. № 1. С. 96 — 102.
2. Сай В.М. Планетарные структуры управления на железнодорожном транспорте // Транспорт: наука, техника, управление. 2002. № 4. С. 13 — 14.
3. Сай В.М., Фомин В.К. Моделирование системы взаимоотношений железной дороги с хозяйствующими субъектами // Транспорт Урала. 2008. № 4. С. 15 — 19.
4. Сай В.М., Сизый С.В., Вихарев С.В., Варанкина К.А. Организация содержания транспортной инфраструктуры в сетях с разделенными интересами с применением математической теории автоматов // Вестник УрГУПС. 2011. № 3. С. 42 — 53.
5. Сай В.М. организация «окон» в графике движения поездов при содержании транспортной инфраструктуры // Вестник УрГУПС. 2009. № 1 — 2. С. 51 — 57.
6. Воробьев Э.В. Технология, механизация и автоматизация путевых работ : учебник для вузов / Э.В. Воробьев, К.Н. Дьяков, В.Г. Максимов и др.; под ред. Э.В. Воробьева, К.Н. Дьякова. М. : Транспорт, 1996. 375 с.
7. Уманский В.И. График для «окна»: технология и прогноз // Мир транспорта. 2011. № 4. С. 45 — 48.
8. Тимухина Е.Н. Технологические сбои и проблемы расчета и обеспечения функциональной надежности железнодорожных станций // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 1. С. 29 — 32.
9. Козлов П.А., Тушин Н.А. Имитационная экспертиза проектов развития инфраструктуры // Мир транспорта. 2011. № 2. С. 22 — 25.
10. Дуплякин М.К. Об отказах путевых машин при ремонтах железнодорожного пути // Вестник УрГУПС. 2011. № 2. С. 73 — 79.
11. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М. : Физматлит, 2001. 320 с.
12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей : учебник для вузов М. : Академия, 2005. 576 с.
13. Решетов Д.Н. Надежность машин : учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев; под ред. Д.Н. Решетова. М. : Высшая школа, 1988. 238 с.
14. Сирина Н.Ф. Надежность технических систем. Вагоны : учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. трансп. Екатеринбург, 2003. 44 с.
15. Лисенков В.М. Статистическая теория безопасности движения поездов : учебник для вузов. М. : ВИНТИ РАН, 1999. 332 с.
16. Щурин К.В. Надежность мобильных машин. Оренбург : ОГУ, 2010. 585 с.
17. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т. 2. Получисленные алгоритмы. М. : Мир, 1977.
18. Сизый С.В., Маевский В.В. Геометрическая прочность сетей. Признаки и показатели надежности сетевых структур // Транспорт, наука, техника, управление. 2010. № 11. С.13 — 20.

References

1. V.M. Say. Planetarnaya struktura: korporativnye varianty [Planetary structure: corporate variants] // Mir transporta, 2003, № 1. P. 96–102. ISSN 1992–3252.
2. V.M. Say. Planetarnye struktury upravleniya na zheleznodorozhnom transporte [Planetary management structures on railway transport] // Transport: nauka, tekhnika, upravleniye, 2002, № 4. P. 13–14. ISSN 0236–1914.
3. V.M. Say, V.K. Fomin. Modelirovaniye sistemy vzaimootnosheniya zheleznoy dorogi s hozyaistvuyuschimi subyektami [Modelling the system of interrelations between railway and economic entities] // Transport Urala [transport of the Urals]. 2008. № 4. P. 15-19. ISSN 1815-9400.
4. V.M. Say. Organizatsiya soderzhaniya transportnoy infrastruktury v setyakh s razdelennymi interesami s primeneniem matematicheskoy teorii avtomatov [Organizing maintenance of transport infrastructure in networks with separated interests using the mathematical automata theory] / V.M. Say, S.V. Sizi, S.V. Vikharev, K.A. Varankina // Vestnik UrGUPS [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2011. № 3. P. 42–53. ISSN 2079-0392.
5. V.M. Say. Organizatsiya “okon” v grafike dvizheniya poezdov pri soderzhanii transportnoy infrastruktury [Organizing gaps in train schedule at transport infrastructure maintenance] // Vestnik UrGUPS [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2009, № 1 2. P. 51-57. ISSN 2079-0392.
6. E.V. Vorobyev. Tekhnologiya, mekhanizatsiya i avtomatizatsiya putevykh rabot [Track work technology, mechanization and automation]: Ucheb. dlya vuzov / E.V. Vorobyev, K.N. Dyakov, V.G. Maksimov etc. Pod red. [Ed. by] E.V. Vorobyev, K.N. Dyakov. M.: Transport, 1996. 375 p.
7. V.I. Umansky. Grafik dlya okna: tekhnologiya i prognoz [Schedule for the gap: technology and forecast] // Mir transporta. 2011. № 4. P. 45 – 48. ISSN 1992–3252.
8. E.N. Timukhina. Tekhnologicheskiye sboi i problem rascheta i obespecheniya funktsionalnoy nadezhnosti zheleznodorozhnykh stantsiy [Technological failures and issues of design and assurance of railway station functional reliability] // Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. 2012. № 1. P. 29 – 32. ISSN 0236-1914.
9. P.A. Kozlov, N.A. Tushin. Imitatsionnaya ekspertiza proyektov razvitiya infrastruktury [Simulation examination of infrastructure development projects] // Mir transporta. 2011. № 2. P. 22 – 25. ISSN 1992-3252.
10. M.K. Duplyakin. Ob otkazakh putevykh mashin pri remontakh zheleznodorozhnogo puti [On track machine failures during track repair] // Vestnik UrGUPS [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2011. № 2. P. 73 – 79. ISSN 2079–0392.
11. A.A. Samarsky, A.P. Mikhailov. Matematicheskoye modelirovaniye [Mathematical modelling]: Idei. Metody. Primery [Ideas. Methods. Examples]. 2-e izd., ispr. M.: Fizmatlit, 2001. 320 p.
12. E.S. Venttsel. Teoriya veroyatnostey [Theory of probability]: Uchebnik dlya stud. vuzov /E.S. Venttsel. 10-e izd., ster. M.: Akademiya, 2005. 576 p.
13. D.N. Reshetov. Nadezhnost mashin [Machine reliability]: Uchebnoye posobiye dlya mashinostr. spets. vuzov/D.N. Reshetov, A.S. Ivanov, V.Z. Fadeyev; Pod red. [Ed. by] D.N. Reshetov. M.: Vyssh. shk., 1988. 238 p.: il. ISBN 5–06–001200–X.
14. N.F. Sirina. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem [Technical system reliability]. Vagony [Coaches]: ucheb. posobiye dlya studentov vuzov zh.-d. transp. Ekaterinburg: 2003. 44 p.
15. V.M. Lisenkov. Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poezdov [Statistical theory of train traffic safety]: Ucheb. dlya vuzov. M.: VINITI RAN, 1999. 332 p.
16. K.V. Schurin. Nadezhnost mobilnykh mashin [Mobile machine reliability]. Orenburg: OGU, 2010. 585 p.: il. ISBN 978–5–7410–1070–9.
17. D. Knuth. Iskustvo programmirovaniya dlya EVM [The art of computer programming], T.2. Poluchislennyye algoritmy [Seminumerical algorithms]. M.: Mir, 1977.
18. S.V. Sizi, V.V. Maevsky. Geometricheskaya prochnost setey [Geometrical strength of networks]. Priznaki i pokazateli nadezhnosti setevykh struktur // Transport, nauka, tekhnika, upravleniye. 2010. № 11. P.13 – 20. ISSN 0236-1914.

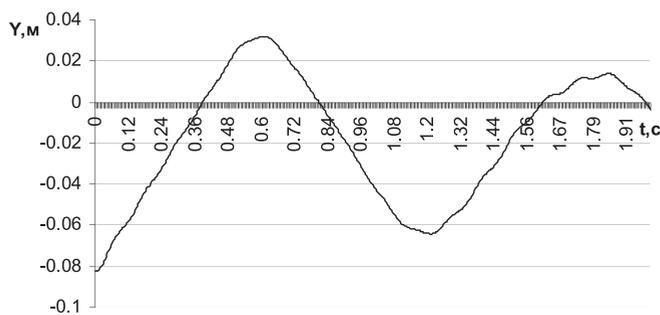


Рисунок 5 — Колебания контактного провода в месте сброса груза на XIII анкерном участке

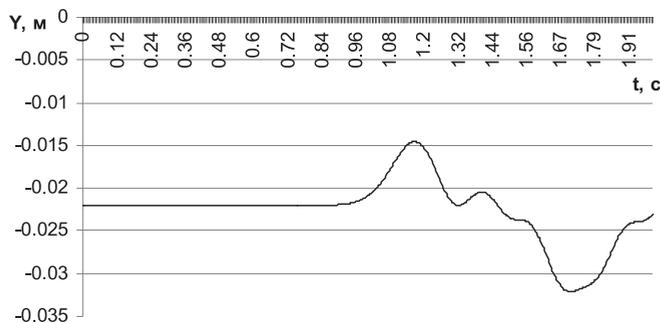


Рисунок 6 — Колебания контактного провода в соседнем пролете анкерного участка XIII (через одну опору, расстояние 130,9 м) от места сброса груза

Средняя скорость распространения поперечной волны составила для подвески Бр-120 + 2БрФ-120 на XI анкерном участке 412 км/ч, для подвески М-120 + 2БрФ-120 на XIII анкерном участке 469 км/ч.

Коэффициент Доплера

Зная скорость распространения поперечной волны вдоль контактной подвески, можно найти оценку коэффициента Доплера, который показывает пригодность контактной сети реализовать заданную максимальную скорость движения без ухудшения качества токосъема. Для расчета оценки коэффициента Доплера воспользуемся известным уравнением

$$\alpha = \frac{(C_p - v)}{(C_p + v)},$$

где C_p — скорость распространения поперечной волны вдоль контактной подвески, км/ч;

v — заданная скорость движения электрического подвижного состава, км/ч.

Зададимся скоростью движения электрического подвижного состава в 250 км/ч, тогда для XI анкерного участка оценка коэффициента Доплера составит

$$\alpha = \frac{(412 - 250)}{(412 + 250)} = 0.245;$$

для XIII -го анкерного участка

$$\alpha = \frac{(469 - 250)}{(469 + 250)} = 0.305.$$

Оценка коэффициента отражения

Коэффициент отражения характеризует только качество контактной подвески, при этом скорость движения электрического подвижного состава не учитывается. Это важный параметр для контактных подвесок, чтобы свести к минимуму возможность образования стоячих волн. Коэффициент отражения, величина которого должна быть меньше единицы, может быть найден по известному уравнению

$$r = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{(H_F \cdot m_F)}{(H_T \cdot m_T)}}\right)},$$

где H_F — натяжение контактного провода, Н;

H_T — натяжение несущего троса, Н;

m_F — масса погонного метра контактного провода, кг/м;

m_T — масса погонного метра несущего троса, кг/м.

Для подвески Бр-120+2БрФ-120 на XI анкерном участке коэффициент отражения составит

$$r = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{(2 \cdot 16500 \cdot 2,136)}{(20250 \cdot 1,068)}}\right)} = 0.356.$$

Для подвески М-120+2БрФ-120 на XIII анкерном участке

$$r = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{(2 \cdot 21000 \cdot 2,136)}{(18000 \cdot 1,068)}}\right)} = 0.316.$$

Оценка коэффициента усиления

Коэффициент усиления определяет степень изменения силы нажатия токоприемника под влиянием процессов, вызванных другими волнами. Для нормального токосъема коэффициент усиления в соответствии с принятыми нормами не должен превышать 2,5. Оценка коэффициента усиления может быть найдена по соотношению

$$\gamma = \frac{r}{\alpha},$$

где α — оценка коэффициента Доплера;

r — оценка коэффициента отражения.

Для подвески Бр-120+2БрФ-120 на XI анкерном участке коэффициент усиления составит

$$\gamma = \frac{0,356}{0,245} = 1.45,$$

Для подвески М-120+2БрФ-120 на XIII анкерном участке

$$\gamma = \frac{0,316}{0,305} = 1.036.$$

Ниже приведены для сравнения в графической форме (рис. 7 — 14) ключевые динамические характеристики обоих анкерных участков, полученные на основе моделирования.

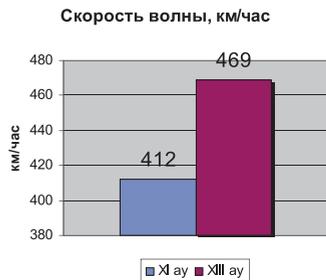


Рисунок 7 — Скорость волны

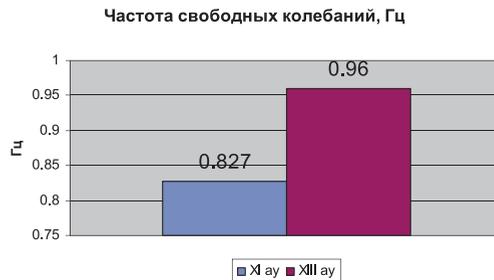


Рисунок 12 — Частота свободных колебаний

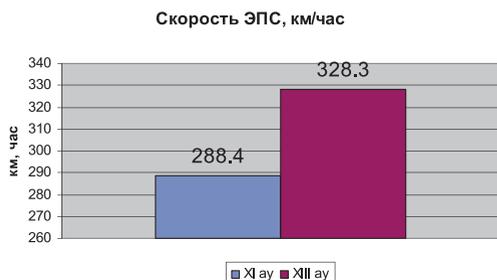


Рисунок 8 — Скорость ЭПС

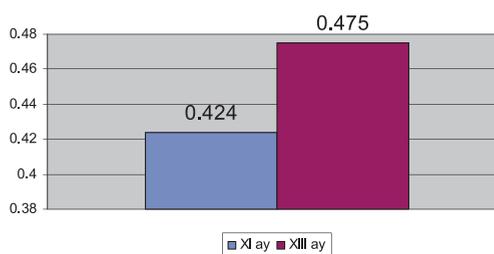


Рисунок 13 — Декремент затухания

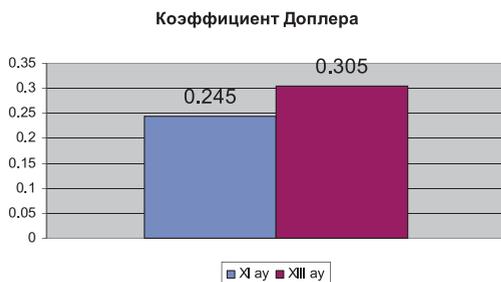


Рисунок 9 — Коэффициент Доплера



Рисунок 14 — Критическая скорость



Рисунок 10 — Коэффициент отражения



Рисунок 11 — Коэффициент усиления

Натурные испытания подтвердили адекватность моделей в пределах инженерной точности расчетов.

Выводы

1. Скорость распространения волны характеризует один из важнейших динамических параметров контактной подвески, оказывающий решающее значение на допустимую скорость движения электрического подвижного состава. Скорость распространения поперечной волны вдоль контактной подвески для подвески на XI анкерном участке составляет 412 км/ч, на XIII анкерном участке 469 км/ч, что в 1,14 раза выше. В соответствии с принятыми нормативами допустимая скорость электрического подвижного состава не может превышать 70% от скорости распространения поперечной волны вдоль контактной подвески. Таким образом, для подвески на XI анкерном участке допустимая скорость движения составляет 288 км/ч, на XIII — 328 км/ч. Оба анкерных участка укладываются в требование достижения скорости движения в 250 км/ч, но у XIII анкерного участка запас по этому параметру больше.
2. Коэффициент Доплера, показывающий пригодность контактной подвески реализовать заданную максимальную скорость движения для подвески на XI анкерном участке составляет 0,245, на XIII анкерном участке 0,305, что в 1,2 раза выше. В соответствии с существующими требова-

- ниями коэффициент Доплера должен быть не менее 0,2. Формально оба анкерных участка удовлетворяют поставленному требованию, но у XIII анкерного участка запас по этому параметру больше.
3. Коэффициент отражения, характеризующий качество контактной подвески по возможности образования стоячих волн для подвески на XI анкерном участке составляет 0,356, на XIII анкерном участке 0,316, что в 1,13 раза меньше. В соответствии с существующими требованиями коэффициент отражения не должен превышать единицу. Оба анкерных участка удовлетворяют поставленному требованию, но у XIII анкерного участка запас по этому параметру больше.
 4. Коэффициент усиления, определяющий степень изменения силы нажатия токоприемника под влиянием процессов, вызванных другими волнами, на XI -м анкерном участке составляет 1,450, на XIII анкерном участке 1,036, что в 1,4 раза меньше. Для нормального токосъема коэффициент усиления не должен превышать 2,5. Оба анкерных участка удовлетворяют поставленному требованию, но у XIII анкерного участка запас по этому параметру больше.
 5. Диссипативная характеристика контактной подвески может в значительной мере повлиять на качество токосъема, особенно при движении электрического подвижного состава с несколькими поднятыми токоприемниками. Средние значения декремента затухающих колебаний для подвески на XIII анкерном участке составили 0,475, на XI анкерном участке — 0,424. Это означает, что контактная подвеска на XIII анкерном участке обладает лучшими диссипативными характеристиками по сравнению с XI анкерным участком.
 6. Проведение вычислительных экспериментов, начиная со стадии проектирования, а затем и опытной эксплуатации позволит на основе отечественного опыта создавать контактные подвески для ВСМ [7].

Литература

1. Муратов Д. Создание сети ВСМ в Российской Федерации: проекты ВСЖМ 1 и ВСМ 2. [Электронный ресурс]. URL :http://www.vedomosti.ru/cgi-bin/get_document.cgi/vedomosti_15-09-2011.ppt.
2. Галкин А.Г. Каковы основные проблемы современной электрифицированной дороги? // Скоростные магистрали : Современный журнал о железных дорогах. 2006. № 1. С. 10.
3. Павлов В.М., Галкин А.Г., Смердин А.Н., Чертков И.Е., Финиченко В.Н. Условия и предпосылки получения фактических параметров контактных подвесок в ходе линейных испытаний // Транспорт Урала. 2007. № 3. С. 51 — 53.
4. Галкин А.Г. Учет пространственной и временной корреляции ветровых нагрузок, действующих на контактную сеть // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта. Технические средства и проблемы безопасности на железнодорожном транспорте, верхнее строение пути : матер. Всерос. науч.-техн. конф. к 125-летию Свердловской железной дороги. В 3 т. Т. 1. Екатеринбург, 2003. С. 188 — 196.
5. Галкин А.Г. Результаты расчета взаимодействия токоприемников с контактной сетью с помощью квазидинамической модели : Деп. в ВИНТИ. 2002. № 1046-B2002.
6. Ефимов А.В., Галкин А.Г. Разработка методов проектирования контактной сети по моделям // Новые технологии — железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств : сб. науч. статей с междунар. участием. Ч. 4. Омск : ОмГУПС, 2000. С. 82 — 83.
7. Галкин А.Г. Разработка контактной сети для ВСМ России / А.А. Ковалев, В.А. Иванов, Е.В. Кудряшов // Инновационный транспорт. Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2011. № 1. С. 18 — 23.

References

1. D. Muratov. Sozdaniye seti VSM v Rossiyskoy Federatsii [Creating HSL network in Russian Federation] proyekty VSZhM 1 i VSM 2 [Projects of HSRL 1 and HSL 2]. http://www.vedomosti.ru/cgi-bin/get_document.cgi/vedomosti_15-09-2011.ppt.
2. A.G. Galkin. Kakovy osnovnyye problemy sovremennoy elektrifitsirovannoy dorogi? [The main issues of a modern electrified road] // Skorostnye magistrali: Sovremenny zhurnal o zheleznykh dorogakh. SPb. 2006. № 1. P. 10.
3. V.M. Pavlov, A.G. Galkin, A.N. Smerdin, I.E. Chertkov, V.N. Finichenko. Usloviya i predposylki polucheniya fakticheskikh parametrov kontaktnykh podvesok v khode lineinykh ispytaniy [Conditions and prerequisites for obtaining actual overhead catenary parameters during road tests] // Transport Urala [Transport of the Urals]. 2007. № 3. P. 51 – 53.
4. A.G. Galkin. Uchet prostranstvennoy i vremennoy korrelyatsii vetrovykh nagruzok, deistvuyuschikh na kontaktnuyu set [Consideration of spatial and time correlation of wind loads onto catenary system] // Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta. Tekhnicheskkiye sredstva i problem bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte, verkhneye stroeniye puti [Facilities and safety issues at railway transport, track structure]: Mater. vseros. nauch. – tekhn. konf. k 125-letiyu Sverdlovskoy zheleznoy dorogi. V 3 t. T1. Ekaterinburg, 2003. P. 188-196.
5. A.G. Galkin. Rezultaty rascheta vzaimodeistviya tokopriemnikov s kontaktnoy setyu s pomoschyu kvasidinamicheskoy modeli [Results of calculating current collector interaction with catenary system using a quasidynamic model]. Dep. at VINITI. 2002. № 1046-V2002.
6. A.V. Efimov, A.G. Galkin. Razrabotka metodov proektirovaniya kontaktnoy seti po modelyam [Developing catenary system design methods using models] // Novye tekhnologii – zheleznodorozhnomu transportu: podgotovka spetsialistov, organizatsiya perevoznogo protsesssa, ekspluatatsiya tekhnicheskikh sredstv: Sb. nauch. statey s mezhdunar. uchastiem. Chast 4. Omsk: OmGUPS, 2000. P. 82 – 83.
7. A.G. Galkin. Razrabotka kontaktnoy seti dlya VSM Rossii [Developing catenary system for Russian HSL] / A.A. Kovalev, V.A. Ivanov, E.V. Kudryashov // Investitsionny transport: Ekaterinburg: Izd-vo AMB. 2011. № 1. P. 18 – 23.

УДК 621.332.3

Александр Васильевич Ефимов, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Денис Александрович Ефимов, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Игорь Григорьевич Дутов, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОГО ТОКА НА РАБОТУ ФИКСАТОРОВ

Alexander V. Efimov, PhD in Engineering, Professor at Transport Power Supply Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT).

Denis A. Efimov – Senior Lecturer at Transport Power Supply Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT).

Igor G. Dutov – postgraduate student at Transport Power Supply Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT)

Studying Traction Current Impact On Lock Operation

Аннотация

Рассмотрены явления, возникающие в узлах фиксации двойного контактного провода при протекании в контактной подвеске электрического тока. Построена расчетная математическая модель, приведена методика и пример расчета сил, действующих на фиксаторы и контактные провода в момент прохождения электроподвижного состава под точкой фиксации. Выполнено сравнение некоторых результатов расчета с данными, полученными в ходе испытаний устройства удаления гололеда импульсно-резонансным методом. Произведена оценка изменения усилий в физической системе токоприемник — контактный провод с учетом рассмотренных явлений. Показано, что в моделях взаимодействия контактной подвески с токоприемником, используемых для оценки износа контактных пар, нужно учитывать влияние тока на величину нажатия. Рассмотрено влияние тока смежных локомотивов на перераспределение силы нажатия между контактными проводами.

Ключевые слова: контактный провод, фиксатор, электрический ток, токоприемник, сила взаимодействия, «слипание» проводов, износ, контактные пары, контактное нажатие, фидерная зона.

Abstract

The article deals with phenomena occurring in retaining units of double contact wire at electric current flow in the overhead catenary. A design mathematical model is constructed, a procedure and example of calculation of forces acting on locks and contact wires during electric stock movement below the fixation point is given. Several calculation results are compared with the data obtained during testing of the pulse-resonant glaze removal device. Force changes in the current collector – contact wire physical system are assessed with account of the considered phenomena. It is shown that the impact of current on the pressure magnitude should be taken into account in models of overhead catenary interaction with the current collector, used to assess contact pair wearing. The impact of current of adjacent locomotives on the redistribution of pressure force between contact wires is considered.

Key words: contact wire, lock, electric current, current collector, interacting force, wires' sticking, wearing, contact pairs, contact pressure, feeder area.

На электрифицированных участках постоянного тока, как правило, применяется подвеска с двойным контактным проводом. Данное техническое решение обусловлено необходимостью увеличения сечения контактной подвески с целью передачи повышенных тяговых токов для пропуска как пассажирских скоростных, так и грузовых тяжеловесных поездов.

Расстояние между контактными проводами a_n составляет 0,04 м, следовательно, они являются близко расположенными параллельными проводниками, по которым в одном направлении протекает ток большой величины. В этих условиях, как известно из курса физики, в проводниках возникают электродинамические силы, направленные навстречу друг другу. Это, в свою очередь, ведет к взаимному притяжению проводов (рис. 1а). Так как для удержания проводов используется фиксаторный узел, не позволяющий им свободно перемещаться в горизонтальной плоскости, то под действием магнитного поля в середине пролета провода изгибаются (рис. 1б).

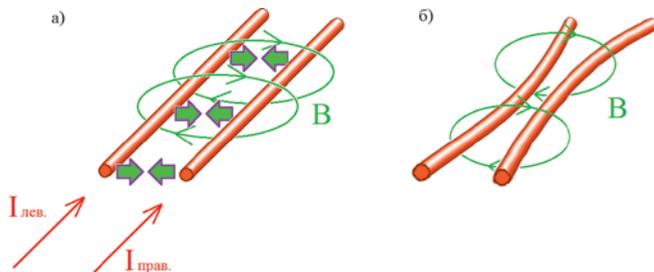


Рисунок 1 — Взаимное притяжение проводов при протекании по ним электротока в одном направлении.

Цель данной статьи — более подробно рассмотреть процессы, которые происходят в фиксаторных узлах в момент прохождения под ними ЭПС в режиме тяги, а также оценить величину сил, действующих в этих условиях на фиксаторы и контактные провода.

Когда на участке отсутствует потребитель электроэнергии и тока в контактной сети нет, физическая система фиксатор — контактный провод находится в состоянии покоя. При появлении же на участке электроподвижного состава (ЭПС) в контактной подвеске начинает протекать ток и возникают явления, описанные выше: появляются силы, действующие на контактные провода. Естественно, при появлении новых усилий система пытается найти новое положение равновесия. На рис. 2 показаны силы, действующие на фиксаторные узлы при протекании по контактным проводам электротока. Силы $F_{лев}$ и $F_{прав}$ — электромагнитные силы, направленные на притяжение контактных проводов, $R_{лев}$ и $R_{прав}$ — силы реакции левого и правого фиксаторов, $F_{рез.лев}$ и $F_{рез.прав}$ — результирующие силы, действующие на левый и правый фиксаторы соответственно.

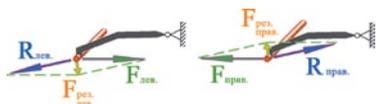


Рисунок 2 — Силы, воздействующие на фиксаторный узел при протекании тока по контактным проводам

Таким образом, тот фиксатор, который удерживает более удаленный от оси пути контактный провод, будет стремиться поднять его. Фиксатор же, удерживающий приближенный к оси пути провод, будет стремиться его опустить.

Оценим величину сил, действующих на рассмотренную нами физическую систему. Для этого примем допущение, что контактные провода являются гибкими нитями, имеющими диаметр, равный ширине провода. Отсюда следует, что уравнения, которые мы будем выводить, справедливы для описания формы кривой оси провода. Для расчета выберем наиболее распространенный тип контактного провода марки МФ-100 шириной $A = 0,0128$ м. Длину пролета l примем равной 60 м. Расчет будем производить с привязкой к системе координат, точка отсчета которой расположена в середине расчетного полета, ровно между проводами (рис. 3).

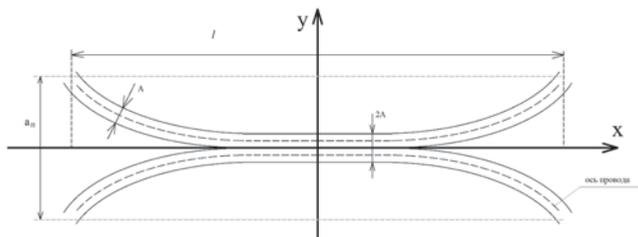


Рисунок 3 — Основные параметры расчетной системы

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом последовательных приближений. Согласно [1], сила взаимодействия двух проводников с током длиной dl определяется по формуле

$$F = \frac{I_{лев} I_{прав} \mu_0 dl}{2\pi a_n}, \quad (1)$$

где $I_{лев}$, $I_{прав}$ — токи, протекающие по левому и правому проводникам, $I_{лев} = I_{прав} = \frac{I}{2}$;

μ_0 — магнитная проницаемость воздуха, $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; dl — длина элемента провода, на котором действуют силы.

Для контактных проводов в момент времени $t = 0$ (условный начальный момент, когда тяговый ток уже протекает по проводам, но сила притяжения на них еще не действует, следовательно, изгиба проводов нет) нагрузка от силы взаимодействия будет распределена равномерно и определяться из выражения

$$g = \frac{I^2 \mu_0}{8\pi a_n} = \frac{p}{a_n}, \quad (2)$$

где $p = \frac{I^2 \mu_0}{8\pi}$.

Из (2) видно, что сила взаимодействия изменяется в зависимости от расстояния между проводниками, следовательно, при изгибе провода нагрузка не будет равномерно распределена по его длине. Отсюда закон изменения нагрузки g по длине пролета примет вид

$$g(x) = \frac{p}{2y(x)}. \quad (3)$$

Производная кривой изгиба провода определяется из выражения

$$y'(x) = \frac{1}{H} \int g(x) dx, \quad (4)$$

где H — натяжение контактного провода, $H = 10000$ Н.

Из принятого нами допущения, что провод является гибкой нитью, можно утверждать, что траектория его изгиба в первом приближении будет соответствовать параболе, которая описывается выражением

$$y'(x) = \frac{A}{2} + \frac{px^2}{2a_n K}. \quad (5)$$

Таким образом, из (4) и (5) получим

$$y'(x) = \frac{1}{H} \int \frac{p dx}{A + \frac{px^2}{a_n H}} = \int \frac{a_n dx}{\left(\frac{Aa_n H}{p} + x^2\right)} = \frac{a_n}{D} \arctg \frac{x}{D} + C_1, \quad (6)$$

где C_1 — постоянная интегрирования.

При решении уравнения (6) для упрощения записи был введен параметр $D = \sqrt{\frac{Aa_n H}{p}}$. Интеграл определен как табличный из [2].

Проинтегрировав выражение (6) и найдя постоянные интегрирования, получим уравнение изгиба провода во втором приближении

$$y(x) = a_n \left(\frac{x}{D} \cdot \arctg \frac{x}{D} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \left(\frac{x}{D} \right)^2 \right) \right) + \frac{A}{2}. \quad (7)$$

Дальнейшее интегрирование полученного уравнения существенных изменений в результатах расчета не дает, но значительно усложняет сам расчет. Примем

$$X = \frac{x}{D} \quad (8)$$

и представим последнее уравнение в относительных единицах в следующем виде:

$$y_i^*(X) = 2X \arctg X + \ln(1 + X^2), \quad (9)$$

причем $y_i^*(X)$ — это функция формы кривой оси провода в плоскости координат со смещенной осью x вверх на $0,5A$,

$$y_i^*(X) = \frac{y(x) - 0,5A}{0,5a_n}. \quad (10)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1 — Результаты расчетов по формуле (9)

X	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$y_i^*(x)$	0	0,03	0,118	0,261	0,453	0,687	0,956

График зависимости $y_i^*(x)$ представлен на рис. 4.

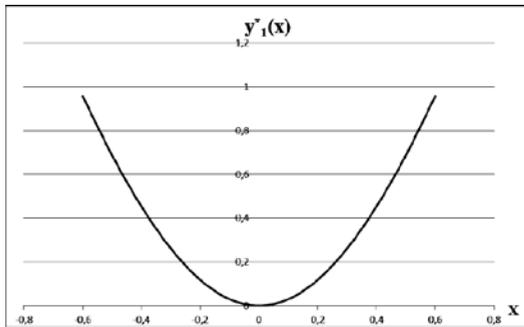


Рисунок 4 — Форма кривой оси одного контактного провода (в системе относительных единиц)

Расстояние от фиксатора до зоны соприкосновения проводов можно определить из условия

$$L_\phi = X_{max} D. \quad (11)$$

Величина D зависит от силы тока и расстояния между проводниками

$$D = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{8\pi a_n A H}{\mu_0}}. \quad (12)$$

Подставив в формулу (12) расчетные значения A , H и μ_ϕ получим следующее выражение:

$$D = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{8\pi a_n A H}{\mu_0}} = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{8 \times 3,14 \times a_n \times 0,0128 \times 10^4}{1,256 \times 10^{-6}}} = \frac{10^5 \times \sqrt{a_n}}{1,98 \times I}.$$

Найдем минимальный тяговый ток I_{min}^{40} (при расстоянии между проводами $a_n = 40$ мм), при котором касание проводов происходит в единственной точке в середине пролета. В этом

случае в точке $x = \frac{l}{2}$ (в системе именованных единиц) значение $y(x)$ будет равно $\frac{a_n}{2}$. Подставив это значение в формулу (10), получим

$$y_k^{*40} = I - \frac{A}{a_n} = I - \frac{12,8}{40} = 0,68.$$

Зная y_k^{*40} находим $X_{max}^{40} = 0,4973$. Из принятого нами условия, что длина пролета $l = 60$ м, и так как точка касания находится ровно в середине пролета, можно найти D , а следовательно, и ток I_{min}^{40} , подставив в формулу (8) вместо x значение $l/2 = 30$ м. В результате получим следующие значения: $D =$

60,33; $I_{min}^{40} = 167,44$ А. Произведя аналогичные расчеты для разных значений расстояния между контактными проводами a_n , сведем полученные результаты в табл. 2.

Таблица 2 — Минимальные токи касания проводов

a_n , мм	40	60	80	100	120	140	160
y_k^*	0,68	0,787	0,84	0,872	0,893	0,908	0,92
X_{max}	0,4973	0,5385	0,5583	0,57	0,5776	0,5832	0,5873
D	60,33	55,71	53,73	52,63	51,94	51,44	51,08
I , А	167,44	222,06	265,84	303,45	336,85	367,36	395,49

Необходимо отметить, что результаты, приведенные в табл. 2, совпадают с результатами натурных испытаний устройства удаления гололеда импульсно-резонансным методом, в которых величина минимального тока касания проводов при расстоянии между ними 40 мм составила приблизительно 160 А [3].

Величина сил взаимодействия P_ϕ контактных проводов, прилагаемых к фиксаторам, равна

$$P_\phi = 2y'(L_\phi) \times H. \quad (13)$$

Для расстояния между контактными проводами $a_n = 40$ мм. Задаваясь разными значениями тягового тока, определим по формулам (11) и (13) расстояние L_ϕ от фиксаторов до зоны «слипания» проводов и величину сил взаимодействия контактных проводов, прилагаемых к фиксаторам P_ϕ . Полученные данные сведем в табл. 3.

Таблица 3 — Результаты расчетов по формулам (11) и (13)

I , А	500	1000	1500	2000
L_ϕ , м	10	5	3,35	2,5
P_ϕ , Н	9,137	18,275	27,4	36,55

Изменение горизонтальных составляющих натяжения фиксаторов приводит к изменению вертикальных, которое можно найти, зная угол наклона фиксатора к горизонтали. При нормативном положении фиксатора (рис. 5) длину стержня фиксатора f можно принять равной 1,2 м, а высоту крепления $h = 0,4$ м.

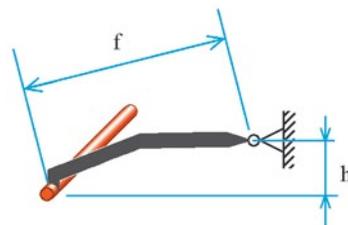


Рисунок 5 — Положение дополнительного стержня фиксатора

При токе 2000 А изменение реакции фиксатора на нажатие токоприемника составит

$$\Delta = P_\phi \times \operatorname{tg}\left(\arcsin \frac{h}{f}\right) = 36,55 \times 3,53553 = 12,92 \text{ Н}.$$

Следовательно, при нажатии токоприемника 120 Н на ближний к опоре контактный провод будет приходиться 47,18 Н, на

дальний — 72,92 Н. Это вызовет перераспределение сопротивления и токов контактных пар и увеличение их износа [4].

Кроме того, положение фиксатора зависит и от климатических факторов. Так, при увеличении температуры и направлении ветра от пути к опоре (для прямого фиксатора) разница вертикальных составляющих будет увеличиваться [5]. Также необходимо отметить, что предлагаемая методика дает оценку влияния тока на контактное нажатие снизу. При учете изгибной жесткости проводов это влияние будет сильнее.

Рассмотрим усилия, возникающие в фиксаторном узле при протекании тягового тока. Для того чтобы доказать, что они не зависят от местонахождения ЭПС на фидерной зоне, рассмотрим пример.

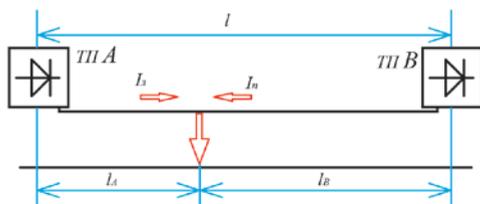


Рисунок 6 — Схема потребления тока электровозом, находящимся на фидерной зоне

Если токоприемник находится под фиксатором, ток в соседних пролетах в первом приближении распределяется обратно пропорционально расстояниям до тяговых подстанций (рис. 6):

$$I_n \times l_A = I_n \times l_B;$$

$$\frac{I_n}{I_n} = \frac{l_B}{l_A};$$

$$I_n = I_n \frac{l_B}{l_A};$$

$$I_n = I_n \frac{l_A}{l}.$$

Примем $l_A = \frac{1}{3}l$, $l_B = \frac{2}{3}l$, $I_n = 2400$ А. Следовательно, $I_n =$

1600 А, $I_n = 800$ А. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
2. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1973. 228 с.
3. Ефимов А.В., Галкин А.Г., Бунзя А.В. Разработка и испытание устройства удаления гололеда с двойных контактных проводов импульсно-резонансным способом // Транспорт Урала. 2007. № 1. С. 105 — 112.
4. Паранин А.В., Ефимов Д.А. Расчет распределения тока в контактном проводе и полозе токоприемника при токосъеме // Транспорт Урала. 2009. № 4. С. 81 — 84.
5. Марквардт К.Г. Контактная сеть: учебник для вузов железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1994. 335 с.

Таблица 4 — Результаты расчета сил, действующих на фиксаторы

a, мм	40	60	80	100	120	140
x_n , м	3,1	3,85	4,44	4,96	5,44	5,87
x_n , м	6,2	7,69	8,88	9,93	10,87	11,74
$\arctg X$	0,4615	0,494	0,509	0,518	0,524	0,528
$\frac{a}{D_n}$	0,0064	0,0078	0,00905	0,01012	0,01108	0,01197
$\frac{a}{D_n}$	0,0032	0,00392	0,00453	0,00506	0,00554	0,00599
$F_{\text{физ}}$, Н	29,54	38,52	46,06	52,42	58,06	63,2
$F_{\text{физ}}$, Н	14,77	19,36	23,03	26,21	29,03	31,62
$F_{\text{физ}}$, Н	44,31	57,88	69,09	78,63	87,09	94,82

Если же электровоз находится в середине фидерной зоны, то $I_n = I_n = 1200$ А. Отсюда получим следующие результаты (табл. 5).

Таблица 5 — Результаты расчета сил при $l_A = l_B$

a, мм	40	60	80	100	120	140
x, м	4,2	5,13	5,91	6,62	7,25	7,83
$\arctg X$	0,4615	0,494	0,509	0,518	0,524	0,528
$\frac{a}{D}$	0,0048	0,00588	0,00679	0,00759	0,00813	0,00898
$F_{\text{ф}}$, Н	44,3	58	69,1	78,63	85,2	94,82

Выводы

1. В моделях взаимодействия контактной подвески с токоприемником, используемых для оценки износа контактных пар, нужно учитывать влияние тока на величину нажатия.
2. Суммарное усилие на фиксатор зависит от величины тока, протекающего в контактных проводах, и не зависит от местонахождения электровоза на фидерной зоне.
3. Токи, потребляемые другими электровозами на этой же подстанционной зоне, и уравнительные токи между подстанциями увеличивают результирующую силу, действующую на фиксаторы, но только в том случае, когда их величина больше встречной составляющей силы тока рассматриваемого электровоза. В противном случае они влияния на фиксаторный узел не оказывают.
4. От длины пролета зависит длина зоны «слипания» проводов. Величина $F_{\text{ф}}$ от длины пролета не зависит.

References

1. L.A. Bessonov. Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki [Theoretical fundamentals of electrical engineering]. Izdaniye devyatoye pererabotannoye i dopolnennoye [Ninth Edition, Corrected and Supplemented]. M.: Vysshaya shkola, 1996. 638 p.
2. H.B. Dwight. Tablitsy integralov i drugie matematicheskiye formuly [Tables of integrals and other mathematical data]. M.: Nauka, 1973. 228 p.
3. A.V. Efimov, A.G. Galkin, A.V. Bunzya. Razrabotka i ispytaniye ustroystva udaleniya gololeda s dvoynnykh kontaktnykh provodov impulsno-resonantnym sposobom [Development and testing of a pulse-resonant glaze removal device for double contact wires] // Transport Urala [Transport of the Urals]. 2007. № 1. P. 105-112.
4. A.V. Pararin, D.A. Efimov. Raschet raspredeleniya toka v kontaktnom provode i poloze tokopriemnika pri tokosyeme [Calculation of current distribution in contact wire and current collector slide at current collection] // Transport Urala [Transport of the Urals]. 2009. № 4. P. 81-84.
5. K.G. Markvardt. Kontaktnaya set [Catenary system]. Uchebnik dlya VUZov zheleznodorozhnogo transporta. M.: Transport, 1994. 335 p.

УДК 621.315.61:621.331:621.311.4

Александр Петрович Сухогузов, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Анна Андреевна Бунзя, аспирант, ассистент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Alexander P. Sukhoguzov, PhD in Engineering, Professor at Electric Machinery Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT).

Anna A. Bunzya – postgraduate student, Assistant Professor at Electric Machinery Chair of Ural State University of Railway Transport (USURT)

Partial Discharges In Insulation Of Traction Substation Electric Equipment

Аннотация

На настоящий момент большая часть электрического оборудования тяговых подстанций железных дорог нуждается в ремонте и не может выполнять свои функции эффективно. По статистике около 37% электрического оборудования выходит из строя по причине старения и (или) пробоя изоляции. Один из факторов, влияющих на состояние изоляции, — частичные разряды, возникновение которых в основном считается случайным и зависит от многочисленных условий.

Цель исследований, представленных в данной статье, — анализ экспериментальных данных (амплитуда кажущегося заряда). Включает в себя: разделение всех данных на характерные типы — Amin, Amax, Aconst; разделение всех данных на сезонные периоды (зимний, летний, демисезонный) и сопоставление их с полученными характерными типами данных; расчет коэффициентов корреляции — для каждого типа и периода конкретно, а также обобщенные коэффициенты корреляции.

Ключевые слова: частичный разряд, электрическое оборудование, тяговая подстанция, изоляция, относительная влажность, система мониторинга, амплитуда кажущегося заряда, условный тип данных, коэффициент корреляции.

Abstract

At present, most of railway traction substation electric equipment needs repair and cannot efficiently fulfill its functions. Statistically, about 37% of electric equipment fails due to insulation ageing and/or breakdown. One of the factors affecting insulation condition is partial discharge generally considered to be random and dependent on many conditions.

The research outlined in this article aims at analyzing the experimental data (apparent charge amplitude). It includes: division of all data into characteristic types – Amin, Amax, Aconst; division of all data into seasonal periods (winter, summer, demi-season) and their comparison with the obtained characteristic data types; correlation factor computation – for each type and period specifically, as well as generalized correlation factors.

Key words: partial discharge; electric equipment; traction substation; insulation; relative humidity; monitoring system; apparent charge amplitude; conventional data type; correlation factor.

Возникающие в электрической изоляции частичные разряды (ЧР) зависят от множества факторов и характеризуются множеством параметров. На сегодняшний день к этим факторам можно отнести воздействия электрического поля, температуры, увлажнения, вибрации, радиации, химически агрессивных продуктов. При этом интенсивность воздействия каждого фактора может быть различной, и в зависимости от этого могут изменяться в худшую сторону свойства изоляции, что влечет за собой преждевременные отказы устройств тяговых подстанций, работа которых должна быть бесперебойна.

Для увеличения эксплуатационного ресурса электрического оборудования — расчетного срока службы устройств — необходима информация о влиянии каждого фактора. Такая информация может быть получена накоплением экспериментальных сведений, а также анализом полученных результатов.

При оценке состояния изоляционных материалов применяются следующие параметры частичных разрядов: кажущийся разряд (q , Кл), мощность (P , Вт), регулярность возникновения (R), частота следования импульсов (N), наибольшее неоднократно встречающееся значение кажущегося разряда, напряжение возникновения частичного разряда (Ui), напряжение погасания ЧР (Ue) и другие [1].

Сложность явления частичных разрядов, опасность их разрушительного действия и потребность практического использования знаний о ЧР привели к необходимости создания максимально точных и достоверных способов исследования электрической изоляции. Один из таких способов — система контроля состояния электрической изоляции в режиме реального времени (система мониторинга) в устройствах электроснабжения железных дорог, она разработана в 2009 г. для распределительного устройства 10 кВ тяговой подстанции [2, 3].

В ходе тестовой эксплуатации системы были получены и проанализированы экспериментальные данные — изменение амплитуды максимального кажущегося заряда (далее — ам-

плитуда ЧР) — для летнего периода времени, длительность эксперимента составила пять дней [3]. Такого промежутка времени наблюдения оказалось недостаточно, чтобы объективно судить о поведении частичных разрядов. Для более точного исследования система мониторинга электрической изоляции была запущена повторно.

Эксперимент проводился в течение шести месяцев, с 13 октября 2010 г. по 25 апреля 2011 г. С целью получения наиболее достоверных результатов рассмотрим экспериментальные данные с разных точек зрения.

1. Условное деление экспериментальных данных на три характерных типа, когда амплитуда частичных разрядов:

- критична (за все время наблюдается несколько таких пиков), выше 20 нКл; наиболее высокая амплитуда за время эксперимента составила 34,5 нКл, — *Amax*;
- высока и составляет около 20 нКл; держится на этом уровне в течение некоторого времени — *Aconst*;
- мала и не превышает 0,25 нКл; держится в таком состоянии некоторое время (от нескольких часов до нескольких дней) — *Amin*.

Сопоставим амплитуду частичных разрядов с условиями окружающей среды (температура воздуха, относительная влажность). Такие параметры, как атмосферное давление и точка росы, не рассматривались, так как по предыдущему анализу коэффициенты корреляции не превышали значения 0,2, что соответствует очень слабой зависимости между характеристиками данных параметров и амплитудой частичных разрядов [4]. Параметры нагрузки (токи, мощности) также не участвовали на этом этапе анализа.

На рис. 1 представлено изменение амплитуды кажущихся зарядов, температуры и влажности для периода *Amax*. Несмотря на отсутствие осадков, данный период характеризуется скачкообразно изменяющейся относительной влажностью воздуха, местами достигающей высоких значений (80%), средняя величина составляет 64,5%.

Установлено, что высокие значения относительной влажности воздуха способствуют общему снижению амплитуды частичных разрядов. Это объясняется шунтированием дефектных полостей каплями влаги на поверхностных участках изоляции, граничащих с внешней средой [3].

Температура в период с 19 по 22 октября 2010 г. дважды опускается ниже нуля, что приводит к преобразованию накопленной изоляцией влаги в лед, т. е. к вымораживанию влаги и проявлению дефектов в этих зонах.

Например:

19.10.10, 00.00 — 19.10.10, 10.00 — понижение температуры окружающей среды до минус 3°C, образование льда на поверхности изоляции. Параллельно идет возрастание амплитуды ЧР, происходит всплеск до 34,5 нКл;

19.10.10, 10.00 — 21.10.10, 4.00 — температура становится положительной, происходит таяние льда и перекрытие образовавшейся влагой дефектных полостей изоляции. Амплитуда кажущихся зарядов плавно уменьшается и постепенно сходит на нет.

Аналогичное поведение амплитуды частичных разрядов наблюдается во всех подобных периодах: при достижении

температуры образования льда происходит всплеск частичных разрядов.

Коэффициенты корреляции данного периода составляют: для амплитуды разрядов и температуры окружающей среды — минус 0,269; для амплитуды разрядов и относительной влажности воздуха — минус 0,046.

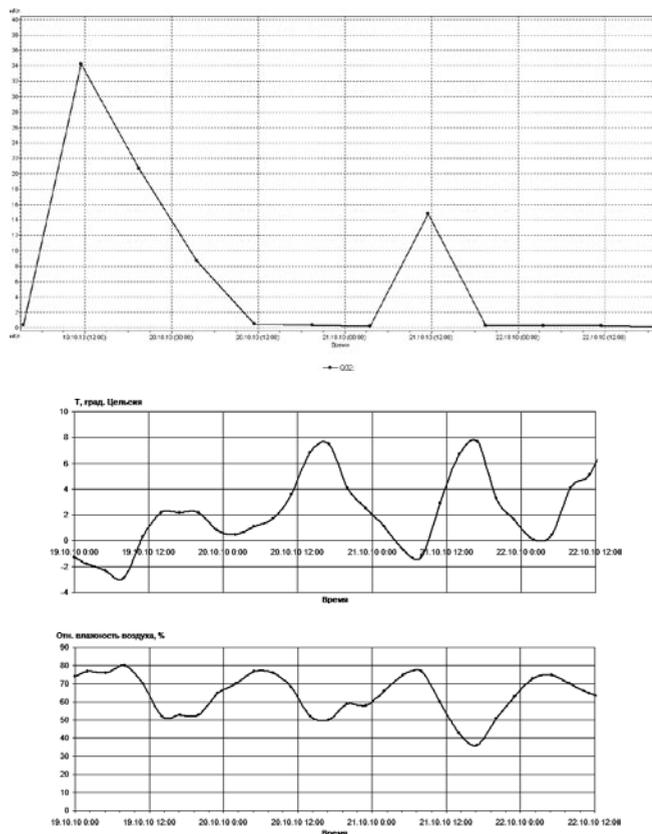


Рисунок 1 — Амплитуда кажущихся зарядов (*Amax*), температура окружающей среды, относительная влажность воздуха (период с 19 по 22 октября 2010 г.)

Период *Amin* характеризуется визуально сухой, прохладной погодой. Весь исследуемый промежуток температура окружающей среды положительна, что указывает на отсутствие льда во включениях изоляции.

ЧР постоянны на всем периоде *Amin*. Средняя амплитуда кажущихся зарядов — 0,21 нКл, максимальная — не превышает 0,25 нКл.

Такое поведение ЧР объясняется высоким процентом относительной влажности окружающей среды, среднее значение которой составляет 79,9% на промежутке *Amin*. Коэффициент корреляции амплитуды разрядов и относительной влажности воздуха составил минус 0,53, что соответствует средней степени связи между этими величинами. Изоляция, подверженная влиянию атмосферных условий, впитывает и удерживает в своих порах капельки воды. Накопленная в небольших количествах влага перекрывает неоднородности поверхности и делает возникновение ЧР невозможным [3].

Наиболее насыщен осадками период *Aconst*. Ежедневно с 4 по 7 февраля 2011 г. идет снег, а в конце периода образуется поземка. Осадки способствуют поддержанию постоянно высокого уровня относительной влажности воздуха, среднее значение — 76,2%.

В то же время температура окружающей среды колеблется в пределах минус 7 — 12°C.

Коэффициенты корреляции на данном периоде составляют: для амплитуды разрядов и относительной влажности воздуха 0,58; для амплитуды разрядов и температуры окружающей среды — 0,645. Коэффициенты корреляции соответствуют средней степени взаимосвязи величин.

На данном промежутке ЧР постоянны, средняя амплитуда кажущихся зарядов составляет 21 нКл, что в 100 раз превышает значение предыдущего периода. Отрицательные значения температуры окружающей среды, непрекращающиеся снегопады приводят к образованию льда в порах изоляции, что способствует полученной картине.

2. Деление экспериментальных данных по временам года.

До настоящего момента изучение влияния погодных условий рассматривалось для летнего периода, когда температура окружающей среды оставалась положительной и при высоких значениях способствовала испарению влаги из дефектных полостей изоляции [2 — 4]. Ниже рассмотрим зимний и демисезонный периоды исследований. В предыдущих работах в качестве иллюстраций анализа были представлены зависимости $Q_{02} = f(t)$, $T = f(t)$, $\varphi = f(t)$, $S = f(t)$, где Q_{02} — амплитуда кажущихся зарядов; T — температура окружающей среды; φ — относительная влажность воздуха; S — электрическая нагрузка оборудования; t — время испытаний.

В данной статье представим результаты анализа в иной форме. Во-первых, в численной (общие по периоду коэффициенты корреляции), во-вторых, каждый из периодов рассмотрим как совокупность характерных типов данных, подробно рассмотренных в пункте 1.

Зимний период испытаний начинается с ярко выраженного типа данных *Amax* (с 1 по 5 декабря 2010 г.). Коэффициенты корреляции за этот период времени составили для амплитуды разрядов и температуры окружающей среды — минус 0,242; для амплитуды разрядов и относительной влажности воздуха — минус 0,031. Порядок коэффициентов соответствует пункту 1.

Достаточно длительный период времени характеризуется типом данных *Amin* (с 5 по 18 декабря 2010 г.). Начиная с 19 декабря 2010 г. переменен с типом *Amin* на непродолжительные промежутки времени (от 3 до 6 дней) появляется тип данных *Aconst*, который становится непрерывным с 18 января по 15 февраля 2010 г. *Aconst* — преобладающий тип данных зимнего периода времени. Коэффициенты корреляции составили 0,63 и минус 0,78 для температуры и относительной влажности по отношению к амплитуде разрядов соответственно.

С 16 по 28 февраля 2010 г. тип данных — *Amax*.

За зимний промежуток испытаний максимальная амплитуда частичных разрядов составила 32,9 нКл. Общие

по зимнему периоду коэффициенты корреляции составили 0,58 и минус 0,72 для температуры и относительной влажности по отношению к амплитуде разрядов соответственно (рис. 2 а, б).

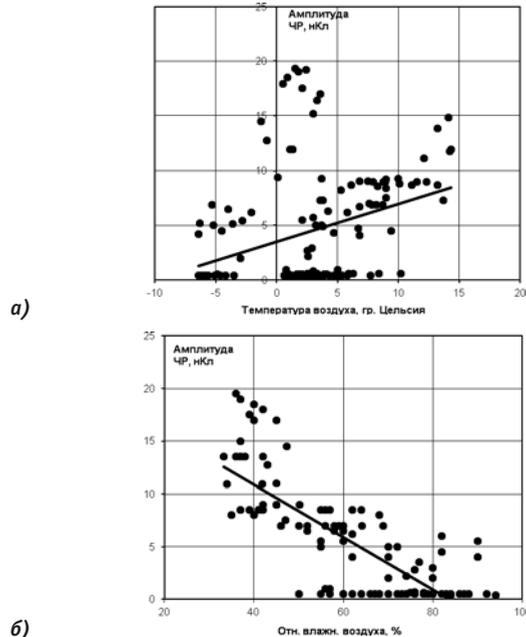


Рисунок 2 — Наблюдаемые пары значений в зимний период испытаний:

а — амплитуды ЧР и температуры окружающей среды;
б — амплитуды ЧР и относительной влажности воздуха

В демисезонный период испытаний соотношение типов данных *Amax*, *Amin*, *Aconst* такое же, как в зимний. Максимальная зарегистрированная амплитуда разрядов составила 27,1 нКл. Общие по демисезонному периоду коэффициенты корреляции составили 0,56 и минус 0,68 для температуры и относительной влажности по отношению к амплитуде разрядов соответственно.

Выводы

Отталкиваясь от коэффициентов корреляции каждого из типов данных, можно отметить, что взаимосвязь амплитуды частичных разрядов с параметрами погодных условий в периоды времени *Amax* очень слабая ($K_t = -0,269$; $K_\varphi = -0,046$). Из этого следует, что всплески амплитуды разрядов объясняются процессами, протекающими в самой изоляции, т. е. на первый план выходят внутренние дефекты диэлектриков, проявление которых не связано с погодными условиями.

Периоды времени *Amin*, *Aconst* имеют достаточно высокую степень корреляции погодных условий и амплитуды разрядов, чтобы привлечь во внимание влияние погодных условий на характеристику частичных разрядов.

Наибольшее влияние на изменение амплитуды частичных разрядов имеет влажность. При ее увеличении изоляция впитывает и удерживает в своих порах капельки воды [5 — 7]. Накопленная влага перекрывает промежутки с пониженной

электрической прочностью, вследствие чего возникновение ЧР становится невозможным.

При повышенных температурах в дневное время суток летнего периода происходит испарение влаги из неоднородностей изоляции. Таким образом, шунтирование ЧР прекращается.

При образовании льда всплески ЧР возобновляются, так как происходит вымораживание влаги из неоднородностей изоляции, что способствует проявлению дефектов в этих зонах.

Такие факторы, как температура окружающей среды и относительная влажность воздуха, взаимосвязаны: повышение температуры до значения, при котором происходит таяние льда, возникновение осадков, несет за собой образование влаги в дефектных областях диэлектрика вновь.

В ряде нормативно-технической документации приводятся сведения о допустимом пороге кажущегося заряда. Данная величина варьируется на промежутке от 10 до 300 пКл [8] в зависимости от вида изоляции (газовая, твердая, бумажно-масляная и др.), типа оборудования и устройств (трансформатор силовой, трансформаторы напряжения и тока, разрядник, выключатель, кабель, изолятор и др.), характера дефектов.

В данном случае с помощью системы мониторинга велось наблюдение за целой секцией шин тяговой подстанции, которая состоит из различного типа оборудования, устройств и вида изоляции. Поэтому полученные результаты анализа данных можно назвать обобщенными. Они будут учтены на следующем этапе исследований частичных разрядов.

Литература

1. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск : Наука, 2007. 155 с.
2. Сухогузов А.П., Пятецкий И.А., Бунзя Александр А., Макаров А.А., Бунзя Анна А. Основные результаты испытаний опытного образца устройства контроля состояния электрической изоляции оборудования тяговых подстанций // Транспорт Урала. 2009. № 3 (22). С. 94 — 99.
3. Бунзя Анна А. Перспективы диагностики электрической изоляции оборудования тяговых подстанций // Вестник УрГУПС. 2011. № 1 (9). С. 101 — 108.
4. Бунзя А.А. Разработка элементов системы диагностики высоковольтной изоляции устройств электроснабжения тяговых подстанций. Екатеринбург : УрГУПС, 2011. 157 с.
5. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта. М. : Маршрут, 2005. 280 с.
6. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л. : Энергия, 1979. 224 с.
7. Вайда Д. Исследования повреждений изоляции : пер. с венг.; под ред. Д.В. Разевица. М. : Энергия, 1968. 400 с.
8. Вдовико В.П. Методология диагностирования высоковольтного электрооборудования. Новосибирск : Наука, 2011. 118 с.

References

1. V.P. Vdoviko. *Chastichnye razryady v diagnostirovaniy vysokovolt-nogo oborudovaniya* [Partial discharges in high-voltage equipment diagnostics]. Novosibirsk: Nauka, 2007. 155 p. ISBN 978-5-02-023510-5.
2. A.P. Sukhoguzov. *Osnovnye rezultaty ispytaniy opytnogo obraztsa ustroystva kontrolya sostoyaniya elektricheskoy izolyatsii oborudovaniya tyagovykh podstantsiy* [Main results of testing a prototype insulation monitoring device for traction substation equipment] / A.P. Sukhoguzov, I.A. Pyatetsky, Alexander A. Bunzya, A.A. Makarov, Anna A. Bunzya // *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2009. № 3 (22). P. 94 – 99. ISSN 1815-9400.
3. Anna A. Bunzya. *Perspektivy diagnostiki elektricheskoy izolyatsii oborudovaniya tyagovykh podstantsiy* [Prospects of diagnostics of traction substation equipment insulation] // *Vestnik UrGUPS* [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2011, № 1 (9). P. 101– 108. ISSN 2079-0392.
4. A.A. Bunzya. *Razrabotka elementov sistemy diagnostiki vysokovolt-noy izolyatsii ustroystv elektrosnabzheniya tyagovykh podstantsiy* [Developing elements of high-voltage insulation diagnostic systems for traction substation power supply units]. Ekaterinburg: UrGUPS, 2011. 157 p.
5. A.S. Serebryakov. *Elektrotekhnicheskoye materialovedeniye* [Electrotechnical material science]. *Elektroizolyatsionnye material* [Electric insulating materials]: ucheb. posobiye dlya vuzov zh.-d. transporta. M.: Marshrut, 2005. 280 p. ISBN 5-89035-210-5.
6. G.S. Kuchinsky. *Chastichnye razryady v vysokovoltnykh konstruktsiyakh* [Partial discharges in high-voltage structures]. L.: Energiya. Leningr. otdeleniye, 1979. 224 p.
7. D. Vaida. *Issledovaniya povrezhdeniy izolyatsii* [Studying insulation damages] / Per. s veng. pod red. D.V. Razeviga. M.: Energiya, 1968. 400 p.
8. V.P. Vdoviko. *Metodologiya diagnostirovaniya vysokovolt-nogo oborudovaniya* [Methodology for high-voltage testing]. Novosibirsk: Nauka, 2011. 118 p. ISBN 978-5-02-019004-

УДК 621.332(076.5)

Александр Геннадьевич Галкин, доктор технических наук, профессор, ректор Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Алексей Анатольевич Ковалев, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Системы автоматизированного проектирования контактной сети» (САПР КС) Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Александр Ваноевич Микава, аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРАКТА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРНОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА

Alexander G. Galkin – DSc in Engineering, Professor, Rector of Ural State University of Railway Transport (USURT),
Alexey A. Kovalev – PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of Laboratory “Computer-aided catenary system design systems” (CS CAD),
Alexander V. Mikava, postgraduate student at Ural State University of Railway Transport (USURT)

Using Lifecycle Contract For Infrastructure Complex Of Current Collection System

Аннотация

Проведен анализ существующих схем реализации проектов высокоскоростных железнодорожных магистралей. Выявлено, что использование схемы государственно-частного партнерства на основе контракта жизненного цикла будет обеспечивать эффективное распределение рисков между заказчиком и подрядчиком, а также позволит получить экономию средств до 30 — 40% при строительстве нового инфраструктурного комплекса системы токосъема.

Предложен расчет лимитной цены отдельного элемента контактной сети и программный продукт, позволяющий выявить другие показатели экономической эффективности (стоимость жизненного цикла, полезный экономический эффект) нового образца техники по сравнению с ее аналогом, который морально и технически устарел.

Ключевые слова: контракт жизненного цикла, стоимость жизненного цикла, годовые эксплуатационные расходы, инфраструктурный комплекс системы токосъема, лимитная цена, полезный экономический эффект.

Abstract

Analysis of the existing patterns for implementation of high-speed railway lines projects is performed. It is revealed that the pattern of state and private partnership based on a lifecycle contract will ensure efficient risk distribution between customer and contractor, as well as cost saving up to 30-40 % during construction of a new infrastructure complex for the current collection system.

Calculation of the limit price of a single catenary system element and a software product is offered, allowing revealing other economic efficiency indicators (lifecycle cost, useful economic benefit) of the new equipment as compared to its out-of-date analogue.

Key words: lifecycle contract; lifecycle cost; annual operation costs; infrastructure complex of current collection system; limit price; useful economic benefit.

ОАО «РЖД» находится на стадии осуществления структурной реформы, которая затрагивает все уровни управления и все сферы деятельности компании. Выделяются дочерние компании, изменяется система управления с учетом требований рынка транспортных услуг с одновременным обеспечением единства управления и безопасности функционирования ОАО «РЖД». Такие масштабные изменения ведущей и крупнейшей железнодорожной компании не имеют аналогов не только в отечественной, но и в мировой практике и затрагивают всю систему базисных принципов и железнодорожного транспорта, и всего транспортного комплекса России, начиная с определения целей, задач и стратегии функционирования в современных условиях и завершая построением адекватной эффективной системы управления компанией. Решается не только серьезная практическая, но и уникальная научно-техническая проблема реинжиниринга и синтеза архитектуры самой компании, адекватной современным геополитическим и макроэкономическим условиям мирового рынка транспортных услуг.

К настоящему времени накоплен обширный опыт эксплуатации контактной сети КС-200, КС-250 различных модификаций, позволяющий сделать вывод о недостаточной надежности целого ряда применяемых в настоящее время конструкций контактной сети. Значительное число отказов зафиксировано по узлам анкеровки контактной подвески, поддерживающим и фиксирующим конструкциям, токопроводящим струнам и элементам арматуры контактной сети [1].

Реализация проекта высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСЖМ-1) планируется по схеме государственно-частного партнерства (ГЧП) на основе *контракта жизненного цикла (КЖЦ)*, известного также под аббревиатурой DBFM

(DesignBuildFinanceMaintain — «проектирование, строительство, финансирование, эксплуатация») [2].

Сейчас в нашей стране применяется «*типовая*» схема (рис. 1), основой которой является разделение проекта на этапы с передачей работ по проектированию, строительству и эксплуатации отдельным подрядчикам и раздельной приемкой результатов работ на каждом этапе.

В результате риски на каждом этапе управляются неэффективно, а вся ответственность в итоге возлагается на заказчика, т. е. на государство. В случае реализации масштабных проектов риски могут повлечь значительный рост затрат, срыв сроков и даже самого проекта.

Схема КЖЦ предполагает формирование единого контракта с подрядчиком (специальной проектной компанией — СПК) на предоставление сервиса (услуги) доступной и качественной инфраструктуры в течение всего срока жизни объекта [2].

В отличие от «*типовой*» схемы (см. рис. 1), при использовании КЖЦ государство не инвестирует средства в магистраль. Проектирование, строительство и сдача объекта (инфраструктурного комплекса системы токосъема) в эксплуатацию происходит за счет подрядчика. После этого государство платит не за объект, а за сервис работающего объекта в течение всего его жизненного цикла, достигающего 30 — 40 лет, используя простой принцип «нет сервиса — нет оплаты».

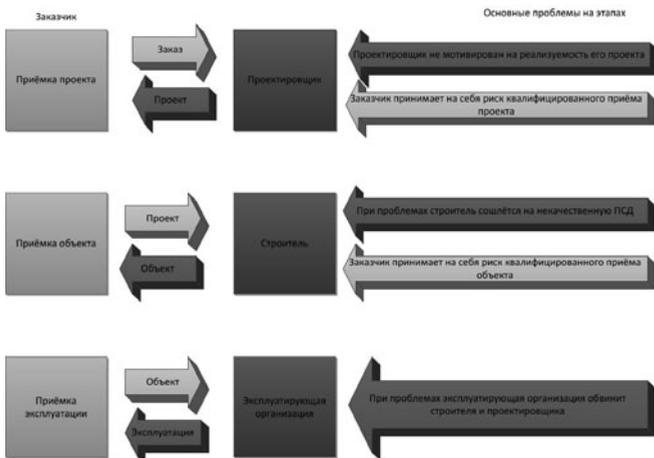


Рисунок 1 — Схема поэтапного выполнения проекта

В предлагаемой схеме КЖЦ (см. рис. 2) государство начинает оплату сервиса только с момента запуска проекта в эксплуатацию и осуществляет ее ежегодно при обязательном выполнении простых и легкоизмеряемых функциональных критериев, таких как время в пути, доступность магистрали, количество опозданий, количество сбоев, аварий и т. п. Государство должно гарантировать подрядчику, что в случае успешного предоставления сервиса оплата будет выполняться регулярно.

Отличительной особенностью КЖЦ является создание у подрядчика правильной мотивации на следующее:

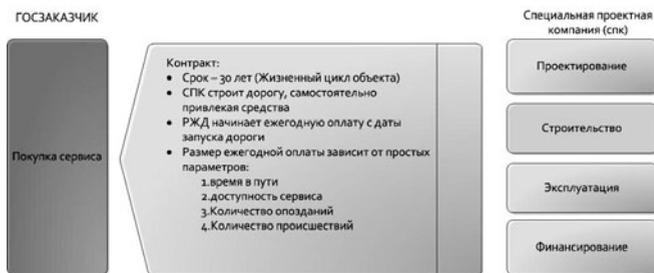


Рисунок 2 — Схема контракта жизненного цикла

- максимальное использование инноваций и высоких технологий (вся экономия от использования современных технологий и правильного проектирования достается подрядчику);
- скорейший ввод объекта в эксплуатацию (оплата сервиса начинается только после ввода объекта в эксплуатацию);
- высокое качество выполняемых работ (в случае сбоя через 15 лет вся нагрузка на ремонт объекта ляжет на подрядчика).

Таким образом, подрядчик будет полностью избавлен от рисков спроса на объект (продажей билетов на поезд или сбором средств за проезд занимается отдельная компания-оператор) и мотивирован только на качество объекта.

Преимущества от использования КЖЦ для государственного заказчика:

- существенное снижение стоимости объекта и его обслуживания;
- избежание всех технологических и проектных рисков;
- существенное снижение количества персонала, задействованного в приемке проекта, и избежание нерационального расходования средств;
- избавление от непредсказуемости будущих затрат на поддержку инфраструктуры.

Таким образом, использование КЖЦ будет обеспечивать эффективное распределение рисков между заказчиком и подрядчиком, охватывать весь жизненный цикл объекта (до 40 и более лет) и объединять в единый комплекс проектирование, строительство и эксплуатацию объекта, что позволит получить экономию средств до 30 — 40%. Это доказано обширным опытом применения КЖЦ во всем мире, в частности на высокоскоростных магистралях (ВСМ).

Сегодня в России не существует высокоскоростного железнодорожного транспорта со скоростью движения свыше 250 км/ч. Соответствующей нормативной базы тоже нет. Разработка собственных стандартов и норм — длительный и дорогостоящий процесс. Наиболее экономичным и естественным решением является внедрение и адаптация европейских стандартов в России (гармонизация стандартов) [3].

Во-первых, использование евростандартов может сэкономить значительные средства, так как не придется тратить средства на разработку собственных.

Во-вторых, будет достигнута огромная экономия средств, поскольку одинаковые стандарты будут служить общим тех-

ническим языком, не требующим переводчиков, для иностранных и российских специалистов в рамках создания ВСЖМ-1. Проекты ВСМ во всем мире — это всегда результат международной кооперации, где взаимопонимание играет фундаментальную роль.

В-третьих, евростандарты задают мощный стимул к инновациям. Этот эффект достигается тем, что в современных европейских стандартах отсутствует описание технологий, а предъявлены лишь функциональные требования к эксплуатационным характеристикам продукции. При таком подходе любая новая технология может тут же внедряться, не требуя изменения самих стандартов. Применение европейской модели стандартов позволит снять барьеры на пути инноваций, что стимулирует конкуренцию и, в свою очередь, заставит производителей повышать качество и снижать цену продукции.

В-четвертых, применение гармонизированных стандартов позволит снизить затраты на строительство ВСЖМ-1 за счет экономии при расходовании материалов, поскольку евроноормы предполагают более эффективные методы строительства и расхода материалов. По предварительным оценкам, ожидаемый эффект от применения гармонизированных с европейскими стандартов составит 10 — 30% от стоимости ВСЖМ-1.

С другой стороны, при переложении европейских стандартов на российский уровень необходимо учитывать местные условия: профиль пути, климат, существующие электроподвижные составы (ЭПС), токоприемники и т. д. Все это будет влиять на стоимость жизненного цикла инфраструктурного комплекса системы токосъема (ИКСТ).

Задача минимизации суммарных затрат на осуществление жизненного цикла техники, наладки схемы ценообразования, а также повышения надежности и безопасности эксплуатируемой техники является общей для ее создателей и потребителей.

Решение этой задачи должно приносить пользу и тем и другим. Для ИКСТ минимизация таких затрат повышает конкурентоспособность продукции и, следовательно, стимулирует расширение рынка сбыта и увеличения прибыли. Для пользователей продукции при этом повышается экономическая эффективность ее эксплуатации.

Чтобы создать условия, стимулирующие производителей развивать свою продукцию, необходимо изменить системы ценообразования и в качестве основного направления принять методологию оценки стоимости жизненного цикла ИКСТ.

В настоящее время понятие «стоимость жизненного цикла» технического средства определяется как совокупные затраты потребителя на приобретение и использование техники за срок ее службы [4].

Технические средства имеют шесть стадий жизненного цикла:

- выработка концепций и определений;
- опытно-конструкторские работы;
- изготовление технического средства;
- внедрение технического средства в эксплуатацию с проведением сопутствующих мероприятий по обучению персонала, дооснащению ремонтной базы и т. п.;

- эксплуатация и техническое обслуживание;
- изъятие (ликвидация, утилизация).

Для потребителя затраты первых трех-четырёх стадий опосредованно выражены в первоначальной стоимости изделия (технических систем) — цене приобретения.

Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) инфраструктурного комплекса системы токосъема железнодорожного транспорта будет определяться суммированием индивидуального оттока денежных средств (расходов) на каждом временном этапе (шаге расчёта) срока службы элементов, из которых состоит система токосъема.

Годовые эксплуатационные расходы — текущие затраты на эксплуатацию ИКСТ, которые рассчитываются в соответствии с номенклатурой доходов и расходов по видам деятельности организации. Они будут состоять из затрат на расходные материалы, содержание эксплуатационного персонала, техническое обслуживание и объезды, текущие, капитальные и неплановые ремонты.

В состав годовых эксплуатационных расходов на содержание эксплуатационного персонала необходимо учитывать затраты на оплату труда работников дистанций электроснабжения (ЭЧ), энергоучастков (ЭЧК), дорожной лаборатории (ДЭЛ) с учетом отчислений на социальные нужды.

В составе доходов за период эксплуатации ИКСТ должны быть учтены доходы от эксплуатации контактной сети и ее ликвидационная стоимость.

Надежность ИКСТ увеличивается за счет его модернизации, улучшения характеристик, уменьшения затрат на производство и эксплуатацию.

Дисконтирование денежных потоков осуществляется посредством введения в расчеты коэффициента дисконтирования, который для постоянной нормы дисконта определяется по формуле [5]

$$\infty_n = \frac{1}{(1+E)^t},$$

где t — шаг расчетного периода ($t = 0, 1, 2, \dots, T$);

T — горизонт расчета (продолжительность жизненного цикла);

E — норма дисконта (ставка дисконтирования).

При изменяющейся по годам норме дисконта коэффициент дисконтирования равен

$$\infty_t = \frac{1}{\prod_{k=1}^t (1+E_k)},$$

где E_k — норма дисконта за k -й год;

∞_0 — коэффициент дисконтирования за шаг расчетного периода $t = 0$.

Ликвидационная стоимость ИКСТ определяется на конечном этапе использования. В нее входят затраты на вывод из эксплуатации и утилизацию, т. е.:

- средства, получаемые от вторичного использования конструкций контактной сети;
- затраты, связанные с демонтажем оборудования, не подлежащего ремонту;
- затраты на транспортировку;
- прочие затраты.

Лимитная цена нового (модернизированного) технического средства — предельно допустимая, рассчитанная на основе изменения его потребительских свойств, улучшения качества, технико-экономических, социальных и экологических параметров по сравнению с техникой-аналогом с учетом определяемого потребителем полезного эффекта за срок службы техники (жизненный цикл).

Лимитная цена определяется на стадии проектирования технического средства в целях оценки экономической целесообразности разработки новой продукции с заданными технико-экономическими параметрами, ограничением роста затрат на ее производство и обеспечением относительного удешевления на единицу конечного полезного результата (эффекта).

В процессе установления лимитных (предельных) цен выбирается базовое техническое средство, с которым сравнивается новая (модернизируемая) техника. За базовую принимается аналогичная по функциональному назначению лучшая отечественная/зарубежная или заменяемая техника. Затем определяются технико-экономические параметры нового (модернизированного) технического средства и сравниваются с соответствующими параметрами базового.

На основе конструктивных параметров и эксплуатационных показателей определяются:

- среднегодовая производительность;
- годовые эксплуатационные расходы на использование базового и нового (модернизированного) технического средства;
- полезный эффект от применения в эксплуатации новой (модернизированной) техники;
- предельная (лимитная) цена нового (модернизируемого) оборудования.

Формула для определения лимитной цены имеет вид

$$C_{\text{нов.лим}} = C_{\text{аналог}} + \text{ЭЭ} \times K_{\text{ЭЭ}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{нов.лим}}$ — лимитная цена новой единицы ИКСТ;
 $C_{\text{аналог}}$ — цена единицы серийного аналога;
 ЭЭ — экономический эффект от использования модели единицы ИКСТ по сравнению с серийным аналогом;
 $K_{\text{ЭЭ}}$ — коэффициент разделения экономического эффекта между производителем и потребителем (определяется на договорной основе).

$$\text{ЭЭ} = \sum_{t=1}^T \frac{\Delta D_t - \Delta P_t}{(1+E)^t}, \quad (4)$$

где ΔD_t — разница в доходах от использования новой модели единицы ИКСТ вместо аналога в период t ;
 ΔP_t — разница в расходах при использовании новой модели единицы ИКСТ вместо аналога в период t ;
 E — коэффициент дисконтирования;
 T — нормативный срок службы.

Шаг периода расчета t (год, квартал, месяц) выбирается по согласованию сторон.

Основным условием расчета лимитной цены в рамках «Методики определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены сложных технических систем железнодорожного транспорта», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД»

от 27 декабря 2007 г. № 2459р [5], является равенство полезной работы, выполняемой инновационной моделью и серийным аналогом. При этом разница в доходной базе (ΔD_t) тождественно равна нулю, и расчет экономически обоснованной цены фактически сводится к определению разницы в производительности единицы инновационной модели и серийного аналога.

Приведем пример расчета лимитной цены поддерживающих конструкций контактной сети. По формуле (4) определим экономический эффект от использования новой модели консоли по сравнению с серийным аналогом. За серийный аналог примем консоль типа НШС-I-5. Ее стоимость в условных единицах составляет 3500, срок службы 30 лет. Принцип определения разницы в расходах не зависит от того, какой рассматривается вид сложных технических систем железнодорожного транспорта. Совокупные расходы определяются как сумма эксплуатационных, ремонтных и прочих расходов. Разница в годовых расходах между новой и старой моделями на направлении l определяется как

$$\Delta P_{l,t} = \Delta P_{\text{экспл.}l} + \Delta P_{\text{рем.}l} + \Delta P_{\text{проч.}l}, \quad (5)$$

где ΔP_l — разница в совокупных расходах новой и старой модели на направлении l ;

$\Delta P_{\text{экспл.}l}$ — разница в эксплуатационных расходах новой и старой модели на направлении l ;

$\Delta P_{\text{рем.}l}$ — разница в ремонтных расходах новой и старой модели на направлении l ;

$\Delta P_{\text{проч.}l}$ — разница в прочих расходах новой и старой модели на направлении l .

Для уже эксплуатируемых сложных технических систем железнодорожного транспорта в качестве расходов используются фактические показатели отчетности, а для новых моделей расходы определяются расчетным образом на основании декларируемых производителем характеристик.

При определении эффективности новых сложных технических систем железнодорожного транспорта уже на стадии конструкторских проработок необходимо оценивать уровень лимитной, т. е. предельно допустимой, цены новой техники.

При расчете принимаем, что на участке контактной сети длиной 100 км разница в эксплуатационных расходах новой и старой модели консоли ($\Delta P_{\text{экспл.}l}$) в год составляет 110 условных единиц, разница в ремонтных расходах новой и старой модели ($\Delta P_{\text{рем.}l}$) — 70, разница в прочих расходах ($\Delta P_{\text{проч.}l}$) — 20.

$$\text{ЭЭ} = \sum_{t=1}^{30} \frac{0 - (110 + 70 + 20)}{(1 + 0,1)^t} = -1885,38 \text{ у.е.}$$

Зная экономический эффект от использования нового типа поддерживающих конструкций, по формуле (3) определим его лимитную цену

$$C_{\text{нов.лим}} = 3500 + (-1885,38 \times 0,7) = 2180,23 \text{ у.е.}$$

Из полученного результата видно, что внедрение новых сложных технических систем железнодорожного транспорта с применением контракта жизненного цикла позволяет умень-

шить его лимитную цену приблизительно на 40%. Аналогично возможно провести расчет для остальных элементов контактной сети, таких как опоры, контактные провода, струны и т. д. В целом использование схемы КЖЦ позволяет получить экономии средств до 30 — 40% от стоимости проекта и его последующего обслуживания, охватывая весь жизненный цикл объекта (до 40 и более лет).

В заключение необходимо отметить, что приведенные выше расчеты требуют больших временных и денежных затрат. Для решения данной проблемы в научно-исследовательской лаборатории САПР КС УрГУПС на основе [5]

разработан программный продукт, при помощи которого рассчитываются показатели эффективности (стоимость жизненного цикла, полезный экономический эффект, лимитная цена) отдельных элементов контактной сети. Применение данной программы дает возможность заранее определить экономический эффект от использования нового образца техники по сравнению с ее аналогом, который морально и технически устарел. В ближайшем будущем планируется адаптация данного программного продукта для всех элементов инфраструктурного комплекса системы токосъема.

Литература

1. Смердин А.Н., Комсюкова Д.А., Усманов Ю.А. Частные вопросы организации скоростного движения на сибирских железных дорогах // Известия Транссиба. 2011. № 4. С. 94 — 99.
2. Проект ВСЖМ-1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения 09.07.2012).
3. Галкин А.Г., Ковалев А.А., Микава А.В. Мониторинг инфраструктурного комплекса системы токосъема в процессе эксплуатации // Инновационный транспорт. 2012. № 1 (2). С. 44 — 49.
4. Кострикин К.О., Скок И.А. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава // Экономика железных дорог. 2012. № 1.
5. О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены сложных технических систем железнодорожного транспорта : распоряжение ОАО «РЖД» от 27 декабря 2007 г. № 2459р.

References

1. A.N. Smerdin, D.A. Komsyukova, Yu.A. Usmanov. Chastnye voprosy organizatsii skorostnogo dvizheniya na sibirskikh zheleznykh dorogakh [Special issues of organizing high-speed traffic at Siberian railways] // Izvestiya Transsiba. 2011. № 4. P. 94 – 99.
2. Proyekt VSZhM-1 [HSRL-1 project] // www.rzd.ru (Date of calling 09.07.2012).
3. A.G. Galkin, A.A. Kovalev, A.V. Mikava. Monitoring infrastruktornogo kompleksa sistemy tokosyema v protsesse ekspluatatsii [Monitoring the infrastructure complex of current collection system in service] // Innovatsionny transport. 2012. № 1(2). P. 44 – 49.
4. K.O. Kostrikin, I.A. Skok. Stoimost zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Lifecycle cost of railway rolling stock] // Ekonomika zheleznykh dorog. 2012. № 1.
5. O metodike opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoy tseny slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta [On procedure for determining the lifecycle cost and limit price of complex technical railway transport systems]: Rasporyazheniye OAO "RZD" ot 27 dekabrya 2007 g. № 2459r.

УДК 621.331

Юрий Антонович Чернов, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Yuri A. Chernov, DSc in Engineering, professor of Power Supply of Electric Railways Chair at Moscow State University of Railway Transport (MIIT)

Optimization Of Traction Power Supply System Development By Dynamic Programming Method

Аннотация

Предложена математическая модель выбора оптимального плана поэтапного развития системы тягового электроснабжения переменного тока, позволяющая в зависимости от исходного технического состояния системы электроснабжения, размеров движения, темпов их роста определить такую последовательность мероприятий и сроки их проведения, которые обеспечивали бы наименьшие затраты на эксплуатацию системы и ее усиление за достаточно продолжительный период времени.

Приведен алгоритм решения поставленной задачи. Поставлена задача оптимизации схемы развития системы электроснабжения как задача динамического программирования по набору высоты самолетом.

Ключевые слова: оптимизация, развитие, система тягового электроснабжения, метод, динамическое программирование.

Abstract

It is offered a mathematical model of choosing the optimal plan of a step-wise development of AC traction power supply system, which depending on the initial operating conditions of power supply system, movement dimensions and speed of their growth, allows to identify the order of activities and time periods for their realization, which provide minimum costs for system exploitation and its strengthening during a long period of time.

The decision algorithm of a set task is offered. The task to optimize the scheme of power supply system development as a task of dynamic programming on plane climb has been set.

Key words: optimization; development; traction power supply system; method; dynamic programming.

Система электроснабжения железных дорог при нормальном развитии экономики является развивающейся системой. Основные ее особенности:

- отсутствие конечной проектной мощности из-за непрерывного возрастания грузопотока;
- большие трудности реконструкции элементов системы в процессе эксплуатации из-за непрерывной работы транспортного конвейера;
- стадийное наращивание мощности отдельных элементов с образованием значительных первоначальных резервов и, как следствие, омертвление капитальных вложений.

Недостаток изолированного рассмотрения отдельных этапов усиления системы электроснабжения состоит в том, что сумма частных оптимальных решений не позволяет получить оптимальное решение по развитию системы в целом. В результате материальные и денежные ресурсы используются неоптимальным образом.

Методология определения оптимальных планов развития системы электроснабжения должна базироваться на следующем [1]. В зависимости от исходного технического состояния (оснащения) системы электроснабжения, размеров движения, темпов их роста требуется определить наивыгоднейшую схему ее поэтапного усиления, т. е. такую последовательность мероприятий и сроки их проведения, которые обеспечили бы наименьшие затраты на эксплуатацию системы и ее усиление за достаточно продолжительный период времени.

Сложность решения этой задачи обусловлена многообразием исходных условий (длина фидерной зоны, профиль, веса поездов), наличием определенных технико-экономических связей между способами усиления, возможностью широкого варьирования очередностью и сроками осуществления различных мероприятий, сравнительно малой точностью данных о перспективном грузопотоке, а также необходимостью учета изменения издержек производства за счет изменений потерь энергии в системе, которые происходят не только в зависимости от технического оснащения системы электроснабжения, но и по годам внутри периода работы на том или ином этапе ее развития.

Учет всего многообразия факторов при решении задачи оптимального наращивания мощности системы электроснабжения требует применения математических методов, по-

звolyающих значительно сократить число рассматриваемых итераций при переборе вариантов в процессе решения и за короткий срок получить оптимальное проектное решение на основе всестороннего исследования операций по наращиванию мощности системы электроснабжения.

Согласно теории исследования операций, в любом случае нас интересует не строго оптимальное решение, а область, в которой оно находится. Исследование операций может только подготовить количественные данные, на основе которых может быть принято разумное компромиссное решение. Само принятие решения выходит за рамки исследования операций и относится к компетентности ответственного лица, чаще — группы лиц, которым предоставлено право окончательного выбора и на которых возложена ответственность за этот выбор. Делая выбор, они могут учитывать наряду с рекомендациями, вытекающими из математического расчета, еще ряд соображений (количественного и качественного характера), которые этим расчетом не были учтены [2].

Недостаток достоверности в информации о росте грузопотока на перспективу ни в коей мере не должен препятствовать использованию оптимизационной экономико-математической модели развития системы электроснабжения.

Следует иметь в виду, что вблизи своего минимума кривая изменения затрат по системе при варьировании тех или иных параметров, как правило, является весьма пологой, что отражает известные свойства экономической устойчивости больших систем.

Задача оптимального управления развитием системы электроснабжения в общем виде поставлена в работе [3].

Система электроснабжения железных дорог S с течением времени дискретно изменяет свое состояние путем проведения тех или иных мероприятий по ее усилению. Состояние системы в каждый момент времени S_t характеризуется определенным набором численных значений факторов. Одни из них заданы заранее (условие выполнения операции). Другие, зависящие от нас факторы образуют в своей совокупности решения x . Назовем последние фазовыми координатами системы. При этом условии состояние системы можно изображать точкой S_t с этими координатами в фазовом пространстве. Изменение состояния системы S в процессе управления будет изображаться как перемещение точки S_t в фазовом пространстве.

Для полной постановки задачи на начальное состояние системы S_0 и конечное S_k обычно накладывают условия. Эти состояния могут быть заданы однозначно или указана область начальных состояний \tilde{S}_0 и область конечных состояний \tilde{S}_k . Каждое мероприятие, связанное с изменением координат точки S_t в момент времени t , представляет собой управление x_t . Траектории перемещения точки S_t из \tilde{S}_0 в \tilde{S}_k могут быть сколь угодно различными. Определим область допустимых управлений как X . Для численной оценки качества управления введем критерии качества Z

$$Z = Z(\tilde{S}_0, x_t, \tilde{S}_k). \quad (1)$$

С учетом изложенного задача оптимального развития системы электроснабжения в общем виде формулируется следующим образом: из множества возможных управлений X найти такое оптимальное управление x^* , которое переводит систему из начального состояния \tilde{S}_0 в конечное \tilde{S}_k так, чтобы критерий (1) достигал экстремального значения.

В работах, связанных с развитием транспортных систем [4], в качестве критерия оптимальности управления применительно к нашему случаю, когда капитальные затраты на усиление по этапам осуществляются одновременно, принято следующее выражение:

$$Z = \sum_{i=1}^n K_i (1+E)^{-t_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=t_{i-1}}^{t_i} \varnothing_i(t) (1+E)^{-t}, \quad (2)$$

где K_i — единовременные капитальные вложения по этапам усиления i ;

n — число этапов усиления;

E — норматив для приведения разновременных затрат (дисконт);

t_{i-1} , t_i — сроки начала и окончания действия периодов эксплуатации системы электроснабжения, когда ее техническое оснащение существенно не меняется;

t — текущий срок эксплуатации системы электроснабжения;

$\varnothing_i(t)$ — эксплуатационные расходы в год t на этапе усиления i .

Характерным для выражения (2) является то, что оно состоит из двух частей. Одна часть связана с капитальными затратами, а вторая — с эксплуатационными расходами. Подобным выражением из двух частей можно представить и прибыль.

При проектировании оптимального развития системы электроснабжения в качестве основного критерия сравнительной экономической эффективности вариантов примем критерий (2). Другие критерии будем учитывать в виде ограничений на уровень напряжения, на нагрев проводов тяговой сети и на надежность вариантов технического состояния системы электроснабжения.

Поставленная задача при критерии качества управления (2) является многомерной вариационной задачей при ограничениях. Метод поиска экстремума и связанного с ним оптимального управления x^* должен выбираться исходя из особенностей функции и вида накладываемых на решение ограничений [2].

Метод динамического программирования для решения транспортной задачи по оптимизации развития пропускной способности впервые применен в работе [5]. Этот метод рекомендуется для решения различных задач перспективного планирования в энергетике [6]. Достоинства метода состоят в том, что он хорошо приспособлен к решению практических задач, характеризующихся наличием ограничений, дискретностью изменений переменных, недифференцируемостью целевой функции и ее нелинейностью.

Отметим, что важным методическим вопросом проектирования развития системы электроснабжения является выбор рационального способа учета временных связей, т. е. учета влияния предшествующих решений по схеме развития системы на последующее ее развитие (прямые связи) и последующего развития системы на первоочередные решения (обратные связи).

В связи с динамичностью процесса развития системы возможен метод моделирования процесса с учетом некоторых промежуточных состояний. При этом непрерывный процесс заменяется дискретным [6]. Метод дискретного моделирования в принципе позволяет учесть динамичность процесса без сколько-нибудь существенной погрешности.

Анализ методов решения задач, подобных рассматриваемой, показал, что наиболее эффективным для проектирования развития системы электроснабжения дорог переменного тока является метод решения в три этапа.

Алгоритм решения задачи заключается в следующем.

1. Предварительно из набора известных мероприятий устанавливаются практически возможные схемы поэтапного развития системы электроснабжения с определенной очередностью их проведения. С этой целью расчетный период разбивается на этапы развития. Получаемое в этом случае дискретное моделирование лучше всего подходит к процессу развития системы электроснабжения железных дорог, когда усиление осуществляется в условиях эксплуатации с проведением строительно-монтажных работ в «окна» и практически не может быть осуществлено непрерывно, т. е. через год.

2. Выбирается критерий качества управления (1). Этим критерием могут быть, например, приведенные затраты в соответствии с выражением (2) или аналогичное выражение для определения прибыли.

Для каждой схемы выполняются расчеты по оптимизации процесса развития системы электроснабжения, т. е. по выбору оптимальных моментов осуществления входящих в схему мероприятий.

3. Ответственным лицом или группой лиц осуществляется выбор схемы развития с учетом наименьших затрат или наибольшей прибыли и других ограничений, не учтенных в расчетах.

Идея метода динамического программирования состоит в том, что отыскание функции многих переменных заменяется многократным отысканием экстремальных значений функции одного или небольшого числа переменных. Задача рассматривается как T-шаговый процесс принятия решения. На каждом шаге (этапе) управление x_t выбирается так, чтобы оптимизировать только один шаг. Однако значение x_t выбирается при этом исходя не только из интересов этого шага, но и с учетом будущего всей операции. Схема решения реализуется с использованием рекуррентных соотношений Р. Беллмана [7]. Важной особенностью метода является инвариантность алгоритма принятия решения к числу шагов, что очень удобно при изменении числа рассматриваемых мероприятий при наращивании мощности системы электроснабжения.

Метод динамического программирования применим к решению задач, удовлетворяющих следующим основным требованиям.

Процесс развития имеет известное завершающее мероприятие.

Критерий оптимальности управления должен быть аддитивным, т. е. складываться из элементарных значений того же критерия, полученного на отдельных шагах.

Задача должна быть с отсутствием последствия, т. е. оптимальное управление на последующем шаге не зависит от того, в результате каких управлений система оказалась на предыдущем шаге.

Решаемая задача по оптимизации схемы развития системы электроснабжения дорог переменного тока отвечает первому требованию. Каждая из возможных схем развития имеет в конце расчетного периода завершающий этап в виде системы 2х25 кВ или в виде системы с экранирующим и усиливающим проводами. Выбор этих мероприятий в качестве завершающих объясняется тем, что при их проведении пропускная способность системы по сравнению с первоначальным состоянием резко увеличивается. Процесс дальнейшего развития системы

на этом, строго говоря, не заканчивается. Например, возможен переход к трехпроводной системе с автотрансформаторами с напряжением между питающим проводом и рельсами 50 кВ (25 + 50 кВ) или системе 2х25 кВ с экранирующим и усиливающим проводами. Но этот процесс настолько растягивается во времени при практически возможном росте грузопотока, что для принятия начальных решений учет дальнейших мероприятий по усилению системы 25 кВ теряет смысл.

Критерий оптимальности управления в нашей задаче (2), представляющий собой суммарные затраты на развитие системы электроснабжения, является аддитивным, что удовлетворяет второму требованию.

В некоторых практически возможных схемах поэтапного развития системы электроснабжения вероятны последствия. Для учета последствия воспользуемся увеличением числа рассматриваемых при сравнении схем с фиксированным значением параметра.

Затраты на этапе подвески усиливающего провода, зависящие от его сечения и от факта, осуществляется расщепление УП или нет, окажут последствие на срок осуществления мероприятия по переходу на систему 2х25 кВ или на систему с экранирующим и усиливающим проводами. Для исключения последствия схему, например, развития

$$25 - \text{УП} - 2 \times 25$$

можно заменить схемами, содержащими различное сечение и конструкцию усиливающего провода (УП₁, УП₂, УП_n):

$$25 - \text{УП}_1 - 2 \times 25;$$

$$25 - \text{УП}_2 - 2 \times 25;$$

$$25 - \text{УП}_n - 2 \times 25.$$

Следовательно, к решению задачи по выбору оптимального варианта развития системы электроснабжения применим метод динамического программирования. Этот метод может служить критерием для возможности применения в проектной практике других менее трудоемких, но и менее точных методов.

Поставим задачу оптимизации схемы развития системы электроснабжения как задачу динамического программирования. Для этого разобьем расчетный срок на m этапов развития. Обозначим через t_{j-1} и t_j соответственно сроки начала и окончания этапа развития с номером j . Оставив прежними остальные обозначения в критерии оптимальности управления (2), представим его в следующем виде:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{ji} (1+E)^{-t_j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{t=t_{j-1}}^{t_j} \Theta_{ji}(t) (1+E)^{-t}, \quad (3)$$

где K_{ji} — единовременные капитальные вложения в конце этапа развития j на этапе усиления i ;

$\Theta_{ji}(t)$ — эксплуатационные расходы в момент времени t на этапе развития j для этапа усиления i .

Дадим процессу управления следующую геометрическую интерпретацию. Исходя из выражения (3) состояние системы электроснабжения можно представить в виде точки в двухмерном фазовом пространстве с координатами Z_3 и Z_k (рис. 1), являющимися функциями соответственно эксплуатационных расходов и капитальных вложений. Управление развитием системы электроснабжения будем осуществлять управлением движения точки S в координатах Z_3 и Z_k .

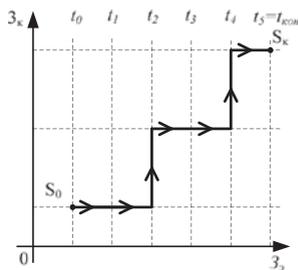


Рисунок 1 — Траектория развития без ограничений

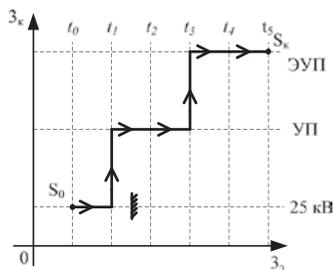


Рисунок 2 — Траектория развития с ограничением

Условимся под шагом управления по оси Z_3 понимать продолжение функционирования системы электроснабжения без изменения ее технического оснащения в течение времени до очередного момента, когда принимается решение об управлении.

Стоимость этого шага управления на этапе развития j для этапа усиления i определяется выражением

$$Z_{жи} = \sum_{t=1}^{t_i} \Theta_{ji}(t)(1+E)^{-t}. \quad (4)$$

Под шагом управления по оси Z_k условимся понимать осуществление дополнительных капитальных вложений на переход от уровня технического состояния i к уровню технического состояния $i+1$.

Стоимость этого шага управления на этапе развития j для этапа усиления i определяется выражением

$$Z_{кji} = K_{ji}(1+E)^{-t}. \quad (5)$$

В результате имеем типичную задачу динамического программирования по набору высоты самолетом.

В соответствии с характерным для динамического программирования приемом оптимизация процесса перемещения точки S из S_0 в S_k производится последовательно для каждого шага, начиная с последнего. На каждом шаге ищется сначала условное оптимальное управление.

Условный оптимальный выигрыш, начиная с шага t и до конца, определяется основным рекуррентным уравнением динамического программирования

$$Z_t^*(S) = \min_{x_t} \{ f_t(S, x_t) + Z_{t+1}(\varphi_t(S, x_t)) \}. \quad (6)$$

Этому выигрышу x_t соответствует условное оптимальное управление на t -м шаге x_t^* .

После того как процесс условной оптимизации дошел до исходного состояния S_0 , снова проводится вся последовательность шагов с начала до конца, и на каждом шаге из множества условных оптимальных управлений выбирается одно.

Поскольку задача оптимизации развития системы электроснабжения имеет технические ограничения (в первую очередь на нагрев проводов и по уровню напряжения), то при производстве безусловной оптимизации, читая соответствующие рекомендации на каждом шаге, следует учитывать технические ограничения, как, например, показано на рис. 2 по сравнению с рис. 1.

Практическое внедрение результатов работы позволит отказать от практики электрификации направления по одной из разновидностей системы электроснабжения переменного тока на всех фидерных зонах.

В зависимости от региональных условий, что определяется главным образом наличием источников питания в энергосистеме, при конкретном профиле пути и при заданных на первый период размерах движения на разных фидерных зонах направления экономически целесообразными окажутся обычная система электроснабжения 25 кВ, система электроснабжения 25 кВ с усиливающим проводом, система 25 кВ с усиливающим и экранирующим проводами или система 2x25 кВ. Это позволит избежать на ряде фидерных зон значительных первоначальных резервов и, как следствие, смертвления капитальных вложений.

Литература

1. Чернов Ю.А. К вопросу о проектировании устройств электроснабжения железных дорог // Межвуз. сб. науч. тр. / МИИТ. 1981. Вып. 684. С. 3 — 5.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 208 с.
3. Чернов Ю.А. Методика выбора оптимального плана развития системы электроснабжения // Межвуз. сб. науч. тр. / МИИТ, 1990. Вып. 831. С. 33 — 42.
4. Козин Б.С., Козлов И.Т. Выбор схем этапного развития железнодорожных линий. М.: Трансжелдориздат, 1964. 151 с.
5. Макарошкин А.М. Оптимизация развития пропускной способности железнодорожных линий. М.: Транспорт, 1969. 200 с.
6. Дале В.А., Кришан Э.П., Пазгле О.Г. Динамические методы анализа развития сетей энергосистем. Рига: Зинатне, 1979. 260 с.
7. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 460 с.

References

1. Chernov Ju.A. K voprosu o proektirovanii ustrojstv elektrosnabzhenija zheleznykh dorog [To the question of designing railway power supply devices] // Mezhevuz.sb.nauchn.tr. / MIIT. 1981. Vyp.684. S.3-5.
2. Venttsel E.S. Issledovanie operatsij. Zadachi, printsipy, metodologija. [Operations' research. Tasks, principles, methodology]. M.: Nauka, 1980. 208 s.
3. Chernov Ju.A. Metodika vybora optimalnogo plana razvitija sistemy elektrosnabzhenija [Method of optimal plan of power supply system development] // Mezhevuz.sb.nauchn.tr. / MIIT, 1990. Vyp.831. S.33 - 42.
4. Kozin B.S., Kozlov I.T. Vybora skhem etapnogo razvitija zheleznodorozhnykh linij. [Choice of schemes for a step-wise railway lines' development] M.: Transzheldorizdat, 1964. 151s.
5. Makarochkin A.M. Optimizatsija razvitija propusknnoj sposobnosti zheleznodorozhnykh linij. [Optimization of development of railway lines' capacity] M.: Transport, 1969. 200s.
6. Dale V.A., Krishan Je.P., Pajegle O.G. Dinamicheskie metody analiza razvitija setej energosistem. [Dynamic methods of analysis of power supply systems' development] Riga: Zinatne, 1979. 260s.
7. Bellman R., Dreyfus S. Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya. [Applied problems of dynamic programming]. M.: Nauka, 1965. 460s.

УДК 629.423.32

Владимир Андреевич Усов, кандидат технических наук, доцент Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург
 Николай Олегович Фролов, кандидат технических наук, доцент Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

АНАЛИЗ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Vladimir A. Usov, PhD in Engineering, Assistant Professor (USURT, Ekaterinburg),
 Nikolay O. Frolov, PhD in Engineering, Assistant Professor (USURT, Ekaterinburg)

Analyzing Switching Overvoltages In Locomotive Power Circuits

Аннотация

В статье выполнен анализ коммутационных перенапряжений в электрических силовых цепях электровазозов постоянного тока. Показано, что величина потенциалов на отдельных элементах электрической схемы зависит от места расположения разрывающего силовую электрическую цепь контактора. Наименьшее значение величина потенциалов имеет при расположении разрывающего контактора в середине схемы.

На основе анализа раскрыты причины перебросов напряжения на заземленные части группового переключателя электровазоза ЧС2 (исполнения 34Е) и показано, как можно уменьшить вероятность этих перебросов.

Даны рекомендации для отечественных электровазозов постоянного тока (особенно вновь проектируемых) располагать разрывающий электрическую цепь контактор в середине схемы. Это повысит эксплуатационную надежность электровазоза.

Abstract

The article analyzes switching overvoltages in DC electric locomotive power circuits. It is shown that the potential value on certain electric circuit elements depends on the location of the contactor interrupting the power circuit. The potential value is smallest when the interrupting contactor is located in the circuit middle.

Based on analysis, the causes of voltage changeover to grounded parts of the group switch of ChS2 electric locomotive (make 34E) are revealed and ways to reduce probability of such changeovers are outlined.

It is recommended for domestic DC electric locomotives (in particular, newly designed ones) to place the contactor, interrupting the electric circuit, in the middle of circuit. It will increase the electric locomotive functional reliability.

В электрических цепях электроподвижного состава (ЭПС) при их отключении и гашении дуги сопровождения возникают перенапряжения. Величина таких перенапряжений, как известно, превышает напряжение контактной сети в несколько раз. В результате может не выдержать электрическая прочность изоляции оборудования, что и приводит к перебросам напряжения на заземленные части оборудования электровазоза с необратимыми последствиями.

Отключение силовых электрических цепей — это сложный переходный процесс, сопровождающийся появлением напряжения на отдельных элементах цепи, превышающих напряжение источника питания. Процесс горения электрической дуги в отключающем контакторе отличается большой нестабильностью, что вызывает значительные трудности при теоретических исследованиях [1, 2], однако можно рассмотреть процессы при гашении электрической дуги, разделив электрическую цепь на два участка. Первый — до места расположения отключающего контактора (до точки 1, рис. 1), второй — после его расположения (после точки 2, см. рис. 1). Таким образом, электрическая дуга как бы исключается из рассмотрения, но, соединив процессы, происходящие в цепи до точки 1 и после точки 2, получим картину процессов, происходящих в дуге.

Упрощенная схема электрической цепи электроподвижного состава в режиме отключения приведена на рис. 1.

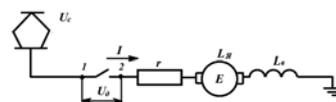


Рисунок 1 — Упрощенная схема электрической цепи ЭПС в режиме отключения

Процесс отключения цепи ЭПС характеризуется следующими уравнениями:

- собственная цепь ЭПС

$$U_c = U_0 + E + Ir + L \frac{dI}{dt}; \quad (1)$$

- цепь контактной сети

$$U_c = U_{c,0} + L_c \frac{dI}{dt}, \quad (2)$$

Как известно, наибольшие перенапряжения в электрической цепи возникают при скорости движения электровоза, равной нулю (т. е. при $E = 0$).

При этом уравнение всей цепи

$$U_{c,0} + L_c \frac{dI}{dt} = U_\delta + Ir + L \frac{dI}{dt}, \quad (3)$$

где $U_{c,0}$ — напряжение контактной сети до переходного процесса;

L_c — индуктивность контактной сети;

L — индуктивность цепи электровоза;

U_δ — напряжения на дуге (между точками 1 и 2);

r — сопротивление цепи ЭПС.

Решение уравнения (3) позволило бы оценить перенапряжения как в точке 1 (см. рис. 1), так и в точке 2, т. е. в местах, где возникают и распространяются по цепям волны перенапряжений. Однако из-за неоднозначности динамических характеристик дуги решение уравнения (3) затруднено. Можно анализировать процессы отключения цепей, рассматривая на эквивалентных (расчетных) схемах, соответствующих уравнению (3), потенциалы точек цепи, исключающих параметры дуги.

Эквивалентная схема ЭПС в режиме отключения, соответствующая уравнению (3), представлена на рис. 2.

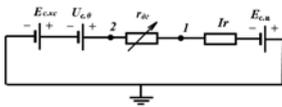


Рисунок 2 — Эквивалентная схема цепи тяговых двигателей в режиме отключения

На основании эквивалентной схемы можно записать

$$E_{c,к} + U_{c,0} = U_\delta + Ir + E_{c,в} \quad (4)$$

где $E_{c,к}$ — ЭДС самоиндукции контактной сети;

$E_{c,в}$ — ЭДС самоиндукции цепи электровоза.

Сопротивление дуги r_{δ} в процессе отключения меняется от нуля до бесконечности.

На рис. 3 показана кривая напряжения и тока электрической дуги при размыкании контактов контактора, т. е. при отключении цепи ЭПС.

Напряжение на дуге в момент ее обрыва зависит от индуктивности цепи L и скорости изменения тока dI/dt . Последняя, кстати, зависит от конструкции дугогасительного устройства. Для тяговых электродвигателей перенапряжение определяется индуктивностью рассеяния. Вихревые токи в остовах тягового двигателя способствуют снижению перенапряжений. Во время движения ЭПС перенапряжения на дуге снижаются, чему способствует наличие противо-ЭДС.

Таким образом, наибольшие перенапряжения в силовой цепи электровоза возникают при скорости, равной нулю, и последовательном соединении тяговых двигателей. Следует учитывать не только перенапряжения на отключаемых частях контактора, но и распространенные перенапряжения на кор-

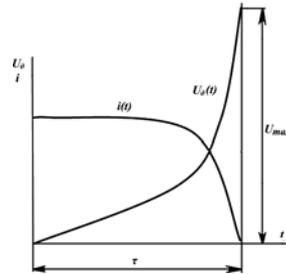


Рисунок 3 — Кривая напряжения и тока электрической дуги при отключении цепи

пусной изоляции машин и аппаратов, которые могут также достигать опасных значений. Максимальное напряжение в различных точках цепи по отношению к «земле» $U_{3,макс}$ определяется не только абсолютными величинами U_δ , E_s и Ir , но и чередованием в цепи ее основных элементов, а именно r , L и выключающего контактора, гасящего дугу сопровождения [1].

Как говорилось ранее, величина перенапряжений в электрической цепи зависит от местоположения отключающего контактора. Анализ перенапряжений в электрической цепи электровоза в зависимости от места расположения отключающего контактора позволит обосновать наиболее рациональное его расположение в цепи.

Рассмотрим три характерных случая расположения отключающего контактора:

- со стороны токоприемника;
- со стороны «земли»;
- в середине схемы.

На рис. 4 показана схема силовой цепи при расположении отключающего контактора со стороны токоприемника.

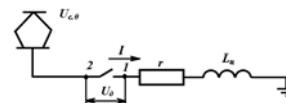


Рисунок 4 — Схема силовой цепи при расположении отключающего контактора в схеме со стороны токоприемника

Необходимо оценить потенциалы точек 1 и 2 (см. рис. 4), определяющих напряжение на дуге и являющихся источниками перенапряжений при отключении цепи.

Потенциал точки 1 по отношению к «земле»

$$U_{1-0} = U_{c,0} + Ir - L_{ц} \frac{dI}{dt}, \quad (5)$$

где $L_{ц}$ — индуктивность цепи электровоза.

Эквивалентная схема приведена на рис. 5.

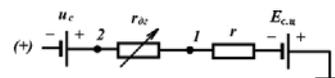


Рисунок 5 — Эквивалентная схема цепи при расположении отключающего контактора в схеме со стороны токоприемника

На рис. 6 показана диаграмма изменения потенциала точки 1 (U_{1-0}) по отношению к «земле». Максимум напряжения достигается в момент погасания дуги, т. е. при $t = \tau$.

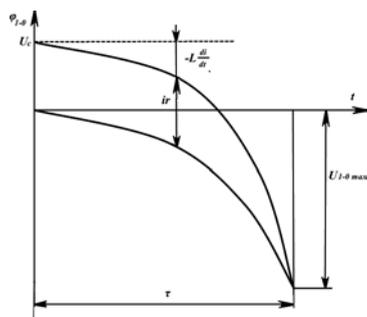


Рисунок 6 — Диаграмма изменения потенциала точки 1

Уравнение баланса напряжения для точки 2

$$U_{2-0} = U_{c,0} + L_{\kappa} \frac{di}{dt} \quad (6)$$

Диаграмма изменения напряжения на дуге представлена на рис. 7 путем совмещения диаграмм изменения напряжений U_{2-0} и U_{1-0} .

Из диаграммы (см. рис. 7) видно, что в момент погасания дуги напряжение и в точке 1, и в точке 2 превышает напряжение контактной сети. Причем, как известно из экспериментальных исследований [3], потенциал точки 1 может превышать напряжение источника питания на электровозах постоянного тока в 4 — 5 раз.

Следует отметить, что напряжение $U_{2-0 \max}$ опасно для изоляции крышевого оборудования электровоза, а напряжение $U_{1-0 \max}$ опасно для изоляции тяговых двигателей и электрических аппаратов.

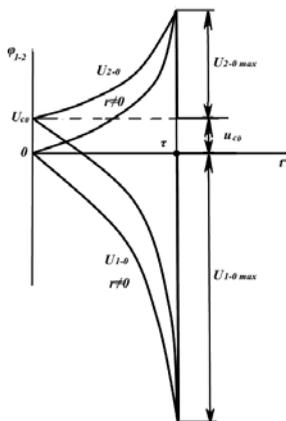


Рисунок 7 — Диаграмма изменения напряжения на дуге при расположении отключающего контактора со стороны токоприемника

Рассмотрим второй случай, когда отключающий контактор расположен в схеме со стороны «земли».

На рис. 8 показана схема силовой цепи при расположении контактора со стороны «земли».

В этом случае напряжение $U_{1-0} = 0$, а напряжение U_{2-0} равно

$$U_{2-0} = U_{c,0} + L_{\kappa} \frac{di}{dt} + L_{\kappa} \frac{di}{dt} - ir, \quad (7)$$

где L_{κ} — индуктивность цепи контактной сети.

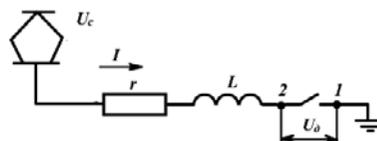


Рисунок 8 — Схема силовой цепи при расположении контактора со стороны «земли»

Кривая напряжения U_{2-0} при расположении контактора со стороны «земли» показана на рис. 9.

Как видно, величина потенциала точки 2 в этом случае значительно превышает значения, рассмотренные в предыдущем случае. Очевидно, поэтому в схемах ЭПС отключающие контакторы не устанавливают в конце электрической схемы.

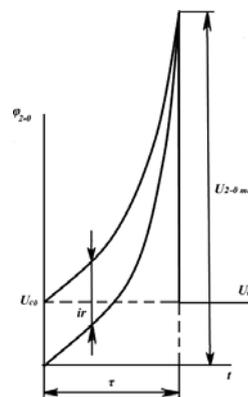


Рисунок 9 — Кривая напряжения U_{2-0} контактора расположенного со стороны «земли»

Упрощенная схема электрической цепи при расположении отключающего контактора в середине схемы электровоза показана на рис. 10.

Рисунок 10 — Упрощенная схема электрической цепи при расположении контактора в середине схемы

Соответствующие этой схеме уравнения для точек 1 и 2:

$$U_{2-0} = U_{c,0} + L_{\kappa} \frac{di}{dt} + L_1 \frac{di}{dt} - ir_1 \quad (8)$$

$$U_{1-0} = U_{c,0} - L_2 \frac{di}{dt} + ir_2 \quad (9)$$

На рис. 11 приведена совмещенная диаграмма изменения напряжений на дуге для этого случая.

Сравнивая диаграммы всех трех случаев расположения отключающего контактора (см. рис. 7, 9, 11), видим, что максимальное напряжение на дуге, равное $(U_{2-0 \max} + U_{1-0 \max})$, во всех случаях одинаково. Действительно, напряжение на дуге в момент ее погасания определяется выражением $L \cdot (di/dt)$, равным во всех трех случаях. Однако потенциал точек 1 и 2 в разных схемах разный. Именно он и представляет опасность для пробоя изоляции и создания аварийного режима. В схеме расположения отключающего контактора в середине цепи он

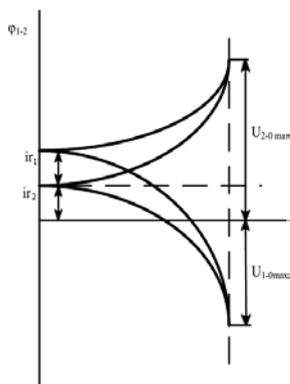


Рисунок 11 — Диаграмма изменения напряжений при расположении контактора в середине цепи

наименьший. Следовательно, и вероятность пробоя изоляции в этом случае наименьшая.

Основываясь на теоретических рассуждениях о перенапряжениях в силовых цепях электровозов, выполним анализ перебросов напряжений на заземленные части электровозов ЧС2 серии 34Е.

По данным локомотивного депо Екатеринбург-Пассажирский, на электровозах ЧС2 серии 34Е случаются перебросы напряжения на корпус главного переключателя с необратимыми последствиями. Отмечается, что перебросы происходят в основном при переходе главного переключателя с рабочей на нулевую позицию, т. е. при разрыве силовой цепи.

Анализ электрической схемы силовой цепи электровоза [4] показал, что разрыв электрической цепи на электровозе ЧС2 серии 34Е осуществляется контакторным элементом группового переключателя Q4-4, расположенном в начале схемы, т. е. перед всеми тяговыми двигателями — источниками электромагнитной электрической энергии. Перенапряжения при этом достаточно велики (см. рис. 7). Для уменьшения перенапряжений необходимо, чтобы разрывающий контакторный

элемент располагался в середине схемы, разделяя индуктивные элементы на две примерно равные части. Перенапряжения при этом существенно снизятся и вероятность пробоев уменьшится (см. рис. 11).

Подобный вывод можно сделать и для других электровозов постоянного тока, в том числе и отечественных. Как правило, контактор, разрывающий электрическую цепь при сбросе нагрузки (тока), располагается в начале схемы, т. е. перед сосредоточением индуктивных элементов. Если же разрывающий контактор располагать в середине схемы, разделяя тем самым накопители электромагнитной энергии, перенапряжения в проблемных точках электрической цепи будут меньше, вероятность пробоя изоляции уменьшится, надежность функционирования схемы повысится.

Таким образом, в данной работе показано, что перенапряжения в отдельных местах электрической схемы силовой цепи электровозов зависит от места расположения разрывающего контактора. Они меньше в том случае, когда разрывающий контактор расположен в середине схемы, разделяя индуктивные элементы (тяговые двигатели) на две примерно равные части.

Для снижения перенапряжений на электровозе ЧС2 серии 34Е целесообразно разрывающий контакторный элемент группового переключателя расположить в середине электрической схемы. Для этого необходимо несколько поменять развертку группового переключателя, что вполне возможно в условиях депо.

Для повышения надежности работы отечественных электровозов постоянного тока также целесообразно располагать разрывающий контактор в середине схемы, разделяя накопители индуктивной энергии (тяговые двигатели) на две примерно равные части. Перенапряжения при этом существенно снизятся. Стоит заметить, что в настоящее время на новых отечественных электровозах 2ЭС6 случаются пробой изоляции тяговых двигателей. Нам неизвестны причины этих пробоев, но перенос разрывающего контактора в середину схемы несколько не ухудшило бы работу электровоза.

Литература

1. Баталов Н.М., Петров Б.П. Тяговые электрические аппараты. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961. 208 с.
2. Плакс А.В. Системы управления электрическим подвижным составом: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2005. 360 с.
3. Кабанов В.Н. Дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИИЖТ, 1958.
4. Раков В.А. Пассажирский электровоз ЧС2. М.: Транспорт, 1976. 320 с.

References

1. N.M. Batalov, B.P. Petrov. Tyagovye elektricheskiye apparaty [Traction electric apparatus]. M.—L.: Gosenergoizdat, 1961. 208 p.
2. A.V. Plaks. Sistemy upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom [Electric stock control systems]: Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta. M.: Marshrut, 2005. 360 p.
3. V.N. Kabanov. Diss. ... cand. tekhn. nauk. L.: LIIZhT, 1958.
4. V.A. Rakov. Passazhirsky elektrovoz ChS2 [ChS2 passenger electric locomotive]. M.: Transport, 1976. 320 p.

УДК 629.4.014.22

Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Виктор Артурович Тихонов, аспирант, ассистент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Игорь Михайлович Пышный, аспирант, ассистент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ЛОКОМОТИВОВ

Alexander P. Buynosov, DSc in Engineering, Assistant Professor at Electric Traction Chair. Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg,

Viktor A. Tikhonov, postgraduate student, Assistant at Electric Traction Chair. Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg,

Igor M. Pyshnyi, postgraduate student, Assistant at Electric Traction Chair. Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg

Procedure For Determining Operation Life Of Locomotive Wheel Set Rims

Аннотация

Приведена методика определения ресурса бандажей колесных пар локомотивов, основанная на полиномиальной зависимости значений контролируемых параметров (нарастание проката, износ гребня и уменьшение толщины бандажа) от наработки (пробега). На основании результатов статистического анализа, проведенного с применением используемой в настоящее время и разработанной методиками, показано, что предлагаемая методика с высокой точностью позволяет более полно описать процесс изнашивания колесных пар, повысить качество прогнозирования ресурса до обточки бандажей. Приведены результаты расчета ресурса до обточки бандажей по максимальному износу гребня колесных пар грузовых электровозов ВЛ11 по существующей и предлагаемой методикам.

Ключевые слова: локомотив, колесная пара, бандаж, ресурс, методика, полиномиальная регрессия.

Abstract

The article gives a procedure for determination of operation life of locomotive wheel set rims, based on polynomial dependency of the controlled parameter values (wheel tread wear, crest wear and reduced rim thickness) on operation time (mileage). Based on the results of statistical analysis performed using the available and elaborated procedures, it is shown that the offered procedure allows more detailed high-accuracy description of the wheel set wearing process, increasing the quality of operation time forecast till rim turning. Results of calculation of operation time till rim turning according to the maximum wear of the VL11 freight electric locomotive wheel set crest are given using the available and offered procedures.

Key words: locomotive, wheel set, rim, operation time, procedure, polynomial regression.

В России в начале 1980-х гг. срок службы бандажей колесных пар локомотивов составлял 6 — 7 лет, а в 1990-е гг. он сократился до 2 — 3 лет. Отказы по износу колес занимают ведущее место среди других технических отказов в эксплуатации локомотивов [1].

Ресурс колесных пар определяется периодичностью технического обслуживания ТО-4, на котором производится обточка бандажей с целью восстановления профиля, а также периодичностью ремонтов ТР-3, на которых производится замена полностью изношенных бандажей [2].

Для того чтобы прогнозировать процесс изнашивания бандажей колесных пар и определить их ресурс, необходимо построить аналитические зависимости числовых характеристик среднего значения M_y и среднеквадратического отклонения σ_y контролируемых параметров от наработки (пробега L).

При проведении исследований в различных депо было выявлено, что износ элементов пары «колесо — рельс» отражает приработочный период, нормальную работу и старение (интенсивный износ). С помощью стратегии ремонтов (переточек) колес попадание их в третий этап — старение, как правило, не допускается. Однако специфика работы колесной пары такова, что при одном фиксированном элементе пары второй этап всегда переменный [3].

Без учета изменений, происходящих в поверхностном слое элементов колесной пары (наклеп, раскат и др.), это должно приводить к регулярной смене этапов (приработка — нормальная работа) до тех пор, пока на некотором интервале времени поверхности пар не станут эквидистантными. В этом случае интенсивность износа рабочих поверхностей значительно уменьшается и для этого интервала становится практически постоянной. При этом происходят благоприятные изменения в поверхностном слое элементов пары: раскат, наклеп, шлифовка, что в некоторый момент времени заметно уменьшает интенсивность износа, который достаточно долго остается без изменений [4].

В общем виде кривая износа имеет вид, приведенный на рис. 1.

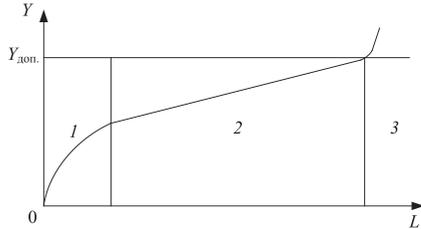


Рисунок 1 — Зависимость величины износа бандажей колесных пар от пробега: 1 — приработочный период; 2 — период нормальной эксплуатации; 3 — период усиленного износа

Наиболее продолжительным является период нормальной эксплуатации. Он характеризуется наименьшей и постоянной величиной интенсивности износа. Как считалось ранее [5], на практике значения контролируемых параметров изнашиваемых деталей локомотивов замеряют не чаще, чем при ТР-1, а период приработки после восстановления бандажей на ремонте ТР-3, СР или КР заканчивается уже к первому ТР-1.

Допуски на значения контролируемых параметров $Y_{\text{доп}}$ эмпирически установлены с целью исключения из эксплуатационного цикла бандажа колесной пары периода усиленного износа. Поэтому значения контролируемых параметров представляют только второй участок функции — период нормальной эксплуатации, где зависимость контролируемых параметров от пробега близка к линейной. Об этом свидетельствует анализ полей корреляции числовых характеристик контролируемых параметров, представленных в [3].

В настоящее время в ремонтных локомотивных депо, в региональных дирекциях по ремонту тягового подвижного состава, на локомотиворемонтных заводах и железнодорожных цехах промышленных предприятий используется разработанная методика анализа изменения значений контролируемых параметров бандажей колесных пар от наработки. При этом используется линейное изменение значений величин проката, толщины гребня и бандажа от пробега, определяется 90%-й ресурс бандажей колесных пар до обточки и смены [3, 5 — 7].

Однако при обточке без выкатки колесных пар из-под локомотива в депо не всегда полностью восстанавливают полную конфигурацию профиля поверхности катания бандажей, оставляя при этом «черновину» как на рабочей поверхности гребня, так и по кругу катания [5]. Поэтому для более точного прогнозирования износа бандажей колесных пар локомотивов в эксплуатации необходимо определять:

- не саму величину проката, а величину нарастания проката (разность между замером и прокатом, оставляемом после обточки бандажей);
- износ гребня (разница между замером толщины гребня и толщиной гребня, оставляемой при обточке);
- уменьшение толщины бандажа (разница между начальной толщиной бандажа и толщиной бандажа на момент замера).

При этом все значения контролируемых параметров бандажей колесных пар будут увеличиваться с увеличением пробега локомотивов, кроме того, становится более наглядным анализ нарастания проката, износа гребня и уменьшения толщины бандажа.

Как известно, выборки контролируемых параметров узлов механической части локомотивов, к которым относятся и бандажи

колесных пар, подверженных износу, с высокой точностью описываются нормальным законом распределения [3]. В этом случае плотность распределения записывается в виде

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-M_y)^2}{2\sigma_y^2}},$$

где M_y — математическое ожидание контролируемого параметра; σ_y — среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра;

y — текущее значение контролируемого параметра.

Таким образом, прогнозирование ресурса осуществляется с помощью нормального закона распределения числовых характеристик контролируемых параметров бандажей на основании построенных зависимостей среднего значения M_y и среднеквадратического отклонения σ_y от пробега L .

В качестве примера приведен статистический анализ величины износа гребней бандажей на основании материала, собранного в результате замеров бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 в ремонтном локомотивном депо Пермь (ТЧР-33) Свердловской дирекции по ремонту тягового подвижного состава при проведении технического обслуживания ТО-2 в период с декабря 2010 г. по май 2011 г. Бандажи колесных пар были обточены по профилю ДМетИ ЛР и на момент производства замеров имели среднюю начальную толщину бандажа 70 мм.

Объемы выборок значений износа гребня бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 депо Пермь приведены в табл. 1.

Таблица 1 — Объемы выборок контролируемых параметров бандажей колесных пар электровозов ВЛ11

Контролируемый параметр	Объемы выборок N	
	минимально необходимые	собранные и использованные в расчете
Износ гребня	143	2525

Как видно из табл. 1, объем полученной выборки значительно превышает минимально необходимый объем выборки, необходимый для получения достоверных результатов, который, однако, оплачен результатами большого труда по сбору значений износа гребня бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 в депо Пермь. Это способствует повышению достоверности результатов статистического анализа и прогнозирования износа гребня бандажей колесных пар локомотивов.

Статистические значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения получены на основе построенной эмпирической зависимости числовых характеристик контролируемого параметра бандажей от пробега. Пробег от момента восстановления исходного профиля до момента замера для каждого локомотива определялся по книгам регистрации эксплуатационных показателей и формам ТХ0-5.

С увеличением пробега колесной пары происходит возрастание вероятности отказа. В каждый конкретный момент вероятность того, что колесная пара при наработке L , находится в неработоспособном состоянии, соответствует заштрихованной площади кривой распределения $f(y)$ над границей $Y_{\text{доп}}$ (рис. 2).

В настоящее время для оценки ресурса бандажей колесных пар используется модель, основанная на линейной зависимости

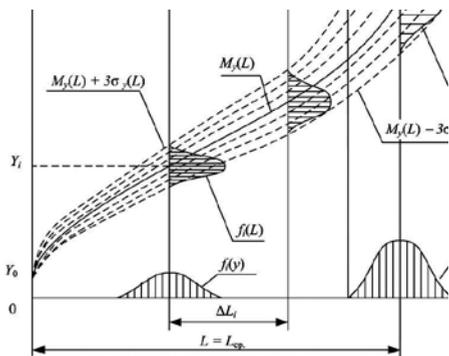


Рисунок 2 — Схема формирования постепенных отказов связей

изменения значений числовых характеристик контролируемых параметров от пробега [8, 9],

$$y(L) = A + B \cdot L,$$

где A и B — коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов.

При этом линейная функция составляется отдельно для зависимостей математического ожидания и среднеквадратического отклонения от пробега, полученных при аппроксимации эмпирических зависимостей $M_y^*(L)$ и $\sigma_y^*(L)$ соответственно:

$$y(L) = \begin{cases} M_y(L) & \text{— при аппроксимации зависимости } M_y^*(L) \\ \sigma_y(L) & \text{— при аппроксимации зависимости } \sigma_y^*(L) \end{cases}$$

Использование линейной аппроксимации основывалось на предположении, что период приработки поверхности бандажа к поверхности рельса составляет относительно малую часть эксплуатационного цикла. С учетом приведенного выше материала это позволяет рассматривать процесс изнашивания бандажей колесных пар по линейной зависимости.

Результаты расчета коэффициентов уравнений линейных регрессий износа гребня от пробега по существующей методике [3] приведены в табл. 2.

Таблица 2 — Коэффициенты уравнений линейной регрессии износа гребней бандажей колесных пар от пробега электровозов ВЛ11

Зависимость	Коэффициенты уравнений регрессии		Коэффициент корреляции R_{y1}	Остаточная дисперсия S_0^2 , мм ²
	A , мм	B , мм/10 ⁴ км		
$M_y(L)$	0,087	0,410	0,930	0,262
$\sigma_y(L)$	0,343	0,140	0,823	0,151

Однако в этом случае не учитывается ряд факторов: техническое состояние пути и локомотива, режим ведения поезда и др. Их действие приводит к увеличению по времени периода приработки и более позднему наступлению периода нормальной эксплуатации, раннему наступлению периода усиленного износа. Опытным путем было установлено, что в различных депо для локомотивов разных серий наступление различных периодов (см. рис. 1) происходит при разной величине износа бандажа. Применение линейной функции для всех без исключения случаев снижает точность прогноза износа бандажей колесных пар локомотивов.

Указанных недостатков лишена модель, основанная на полиномиальной функции. При этом зависимости математического ожидания $M_y(L)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_y(L)$ от пробега аппроксимируются в виде полиномов

$$y(L) = \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i),$$

где A_i — коэффициенты полиномов;

m — порядок полинома.

Определение коэффициентов полиномов производится по методу наименьших квадратов [3]:

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^m \left[A_k \cdot \sum_{i=0}^n L_i^{k+0} \right] = \sum_{i=0}^n (Y_i \cdot L_i^0), \\ \sum_{k=0}^m \left[A_k \cdot \sum_{i=0}^n L_i^{k+1} \right] = \sum_{i=0}^n (Y_i \cdot L_i^1), \\ \dots \\ \sum_{k=0}^m \left[A_k \cdot \sum_{i=0}^n L_i^{k+n} \right] = \sum_{i=0}^n (Y_i \cdot L_i^n). \end{cases}$$

Поскольку величина износа гребня, нарастания проката или уменьшения толщины бандажа с ростом пробега может только увеличиваться, полиномиальная функция должна быть монотонно возрастающей на всем исследуемом промежутке от момента восстановления конфигурации профиля поверхности катания $L(Y_0)$ до пробега (см. рис. 2), при котором достигается допустимое в эксплуатации значение контролируемого параметра $L(Y_{доп.})$

$$\left. \frac{dM_y(L)}{L} \right|_{L(Y_0)}^{L(Y_{доп.})} > 0. \quad (1)$$

Вид искомой характеристики, полученной в результате аппроксимации, во многом определяется порядком полиномиальной функции p . Большие значения p увеличивают коэффициент корреляции R_{y1} , однако при чрезмерно высоких значениях невозможно достичь монотонности функции. Таким образом, необходимо определить оптимальную степень полинома, позволяющую максимально точно описать заданную выборку $Y(L)$.

Дисперсия выборки значений объемом $(n + 1)$ от аппроксимированной полиномиальной функции определяется как

$$S_0^2 = \frac{1}{n - m} \sum_{i=1}^n (Y^{**}(L_i) - Y_i)^2,$$

где $Y^{**}(L_i)$ — значения аппроксимированной функции параметра от значений пробега, заданных исходной выборкой;

Y_i — заданные исходной выборкой детерминированные значения параметра.

Порядок полинома m должен быть выбран таким образом, чтобы величина дисперсии S_0^2 исходной выборки от полинома была минимальной,

$$S_0^2(m) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Таким образом, в качестве искомого выбирается полином, удовлетворяющий условиям (1) и (2). Результаты, полученные с использованием разработанной модели, сведены в табл. 3.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что использование полиномиальных зависимостей для описания изменения значений контролируемых параметров от пробега говорит о более тесной статистической связи эмпирической и аппроксимированной зависимостей, так как в этом случае остаточные дисперсии значительно меньше, а коэффициенты корреляции полученных полиномов выше аналогичных для линейной функции.

Графически исходные детерминированные и аппроксимированные зависимости для величин среднего значения и средне-

Таблица 3 — Коэффициенты уравнений полиномиальной зависимости износа гребней бандажей колесных пар от пробега электровозов ВЛ11

Зависимость	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции $R_{y,x}$	Остаточная дисперсия, S_y^2 мм ²
$M_y(L)$	$0,148 + 0,059 \cdot L - 1,439 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 + 1,955 \cdot 10^{-5} \cdot L^3$	0,976	0,178
$\sigma_y(L)$	$0,167 + 0,050 \cdot L - 1,231 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 + 1,118 \cdot 10^{-5} \cdot L^3$	0,907	0,126

квадратического отклонения износа гребня от пробега приведены на рис. 3, 4.

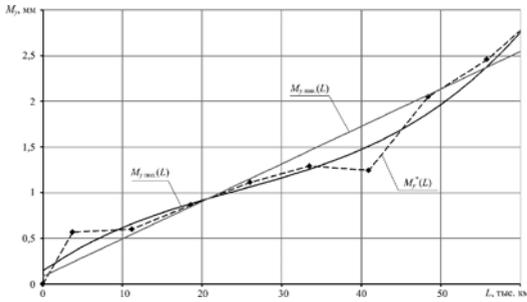


Рисунок 3 — Зависимость среднего значения износа гребня бандажей колесных пар от пробега

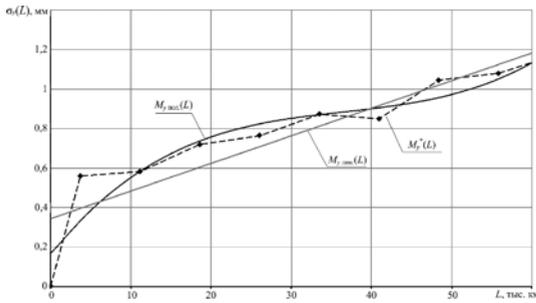


Рисунок 4 — Зависимость среднеквадратического отклонения величины износа гребня бандажей от пробега

В качестве подтверждения повышения точности прогнозирования при использовании полиномиальной модели используется статистическая гипотеза о равенстве остаточных дисперсий уравнений регрессии контролируемого параметра. Проверка производится по критерию Фишера (F -критерию) по формуле

$$\hat{F} = \frac{S_{0\text{лин.}}^2}{S_{0\text{пол.}}^2},$$

где $S_{0\text{лин.}}^2$ — дисперсия выборки аппроксимированной линейной функции;

$S_{0\text{пол.}}^2$ — то же полиномиальной функции.

Распределение Фишера табулировано, величина F -критерия зависит от уровня значимости α и числа степеней свободы m . При $\hat{F} < F_{\alpha,m}$ различие остаточных дисперсий $S_{0\text{лин.}}^2$ и $S_{0\text{пол.}}^2$ можно считать случайным, т. е. гипотеза принимается. В противном случае гипотеза отвергается и делается вывод о том, что между дисперсиями выборок от аппроксимированной линейной и полиномиальной функций имеются значительные

различия, что свидетельствует о большей точности полиномиальной функции.

Результаты проверки по критерию Фишера найденных уравнений регрессии для уровня значимости 0,05 приведены в табл. 4.

Таблица 4 — Результаты проверки гипотезы о равенстве остаточных дисперсий

Зависимость	Расчетное значение критерия \hat{F}	Табличное значение критерия $F_{\alpha,m}$	Гипотеза принимается?
$M_y(L)$	1,471	1,13	нет
$\sigma_y(L)$	1,198	1,13	нет

Таким образом, гипотеза не принимается в обоих случаях, что позволяет рассматривать полиномиальную аппроксимацию износа гребня от пробега как более точную модель для прогнозирования износа бандажей колесных пар локомотивов по сравнению с линейной функцией.

На основании аппроксимированных зависимостей $M_y(L)$ и $\sigma_y(L)$ возможно прогнозирование процесса изнашивания и определение предельного ресурса бандажей колесных пар. При этом оценка остаточного ресурса производится при заданном значении вероятности перехода механической системы в предельное состояние.

Функция плотности распределения для нормального закона

$$f_y(L) = \frac{1}{\sigma_y(L) \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Y - M_y(L))^2}{2[\sigma_y(L)]^2}}.$$

Допустим, что в общем случае зависимости

$$M_y(L) = \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i) \text{ и } \sigma_y(L) = \sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i),$$

где A_i и B_i — коэффициенты полиномов зависимостей соответственно среднего значения и среднеквадратического отклонения износа гребня бандажей колесных пар локомотивов от пробега.

Тогда функция плотности распределения примет вид

$$f_y(L) = \frac{(L-1)}{B \cdot \sqrt{2\pi} \cdot (L^{n+1} - 1)} \cdot e^{-\frac{[(L-1)(Y - \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i))]^2}{2[B(L^{n+1} - 1)]^2}}.$$

Выход контролируемых параметров за установленный допуск классифицируется как отказ работы бандажа, предельный износ. Таким образом, с увеличением пробега L возрастает вероятность отказа P . Для износа гребня вероятность отказа при заданном пробеге равна [3]

$$P(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y_{\text{доп.}}}^{\frac{Y - \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i)}{2 \left[\sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i) \right]^2}} \frac{1}{\sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i)} e^{-\frac{(Y - \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i))^2}{2 \left[\sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i) \right]^2}} dy.$$

Используемый в депо железнодорожного транспорта общего и необщего пользования разработанный в Уральском государственном университете путей сообщения переносной электронный прибор КИП-03 [10] с программным обеспечением на ПЭВМ по сравнению с универсальными шаблонами УТ-1М позволяет повысить точность замера контролируемых параметров и осуществлять прогнозирование износа бандажей колесных пар локомотивов, определять ресурс до обточки и смены. Относительная

погрешность прибора КИП составляет 2 — 5%, тогда как УТ-1М не превышает 10%.

При выполнении восстановления контролируемых параметров бандажей при пробеге до достижения величины наработки, равной 95%-му ресурсу, вероятность отказа бандажа до этого момента не превысит величины 5%. При этом отклонение измеренного значения контролируемого параметра от реальной величины также окажется в пределах $\pm 5\%$, что покрывается интервалом относительной погрешности прибора КИП-03.

Для оценки ресурса бандажей необходимо знать предельное значение контролируемого параметра $Y_{\text{доп}}$. Установленный допуск для износа гребня бандажа (уменьшение толщины гребня) электровозов серии ВЛ11, колесные пары которых имеют конфигурацию профиля поверхности катания ДМетИ ЛР с уменьшенной толщиной гребня до 30 мм, составляет 5 мм.

На основании выполненных расчетов строятся зависимости $P(L)$, и по ним определяется γ %-й ресурс колесных пар, т. е.

такой пробег, которому соответствует вероятность безотказной работы или вероятность отказа $P = 1 - \gamma$.

Результаты расчета 95%-го ресурса до обточки по предельному износу гребня бандажей колесных пар электровозов ВЛ11, определенные по разным моделям, приведены в табл. 5.

Таблица 5 — Ресурс до обточки бандажей по предельному износу гребня

Модель	Ресурс бандажей, тыс. км
Существующая	58,2
Предлагаемая	52,7

Разработанная модель с использованием переносного электронного прибора КИП-03 с программным обеспечением на ПЭВМ в отличие от используемой в настоящее время позволяет более точно прогнозировать износ бандажей в эксплуатации и определять ресурс до обточки и смены колесных пар локомотивов.

Литература

1. Горский А.В., Буйносов А.П. Анализ износа бандажей // Железнодорожный транспорт. 1991. № 1. С. 46 — 47.
2. Буйносов А.П., Медведев Н.Ф. Автоматизация измерения проката бандажей колесных пар электровозов // Железнодорожный транспорт: Обзорная информация. Сер. Локомотивы и локомотивное хозяйство, ремонт локомотивов / ЦНИИТЭИ МПС. 1991. Вып. 5. С. 1 — 9.
3. Буйносов А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. 224 с.
4. Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Пышный И.М. Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Транспорт Урала. 2011. № 1 (28). С. 64 — 69.
5. Горский А.В., Буйносов А.П., Наговицын В.С., Клинский В.С. Экономичная обточка // Локомотив. 1992. № 4. С. 26 — 27.
6. Буйносов А.П., Тихонов В.А. Повышение износостойкости колесных пар электроподвижного состава за счет обработки гребней триботехническим составом // Транспорт Урала. 2011. № 3 (30). С. 59 — 64.
7. Горский А.В., Буйносов А.П., Боярских Г.С., Лавров В.А. Бандажи и рельсы (опыт Свердловской дороги) // Локомотив. 1992. № 4. С. 25 — 26.
8. Буйносов А.П. Повышение ресурса бандажей колесных пар электровозов в результате изменения технологии их обточки // Автоматизация и современные технологии. 1992. № 8. С. 23 — 25.
9. Буйносов А.П. Автоматизированный контроль параметров колесных пар тягового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2010. № 7. С. 52 — 53.
10. Буйносов А.П., Тихонов В.А. Новый гребнесмазыватель твердого типа // Железнодорожный транспорт. 2011. № 10. С. 54 — 55.

References

1. A.V. Gorsky, A.P. Buynosov. Analiz iznosa bandazhey [Rim wear analysis] // Zheleznodorozhny transport. 1991. № 1. P. 46-47.
2. A.P. Buynosov, N.F. Medvedev. Avtomatizatsiya izmereniya prokata bandazhey kolesnykh par elektrovovozov [Automated measurements of electric locomotive wheel set rim wear] // Zheleznodorozhny transport: Obzornaya informatsiya. Seriya: Lokomotivy i lokomotivnoye khozyaistvo, remont lokomotivov. CNIIETI MPS, 1991. Vyp. 5. P. 1-9.
3. A.P. Buynosov. Osnovnye prichiny intensivnogo iznosa bandazhey kolesnykh par podvizhnogo sostava i metody ikh ustraneniya [Basic causes of intensive wear of rolling stock wheel set rims and methods of their elimination]. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2009. 224 p.
4. A.P. Buynosov, D.L. Khudoyarov, I.M. Pyshnyi. Vybory profilya poverkhnosti kataniya bandazhey kolesnykh par promyshlennykh teplovovozov [Selecting profile of tread surface of industrial diesel-powered locomotive wheel set rims] // Transport Urala [Transport of the Urals]. 2011. № 1(28). P. 64-69.
5. A.V. Gorsky. Ekonomichnaya obtochka [Cost-effective turning] // A.V. Gorsky, A.P. Buynosov, V.S. Nagovitsyn, V.S. Klinsky // Lokomotiv. 1992. № 4. P. 26-27.
6. A.P. Buynosov, V.A. Tikhonov. Povysheniye iznosostoikosti kolesnykh par elektropodvizhnogo sostava za schet obrabotki grebney tribotekhnicheskim sostavom [Increasing endurance of electric stock wheel sets due to crest treatment with a tribotechnical compound] // Transport Urala [Transport of the Urals]. 2011. № 3 (30). P. 59 – 64.
7. Bandazhi i relsy (opyt Sverdlovskoy dorogi) [Rims and rails (Sverdlovsk road experience)] // A.V. Gorsky, A.P. Buynosov, G.S. Boyarskikh, V.A. Lavrov // Lokomotiv. 1992. № 4. P. 25-26.
8. A.P. Buynosov. Povysheniye resursa bandazhey kolesnykh par elektrovovozov v rezultate izmeneniya tekhnologii ikh obtochki [Increasing operating time of electric locomotive wheel set rims due to changed turning technology] // Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii. 1992. № 8. P. 23-25.
9. A.P. Buynosov. Avtomatizirovanny kontrol parametrov kolesnykh par tyagovogo podvizhnogo sostava [Automated monitoring of traction equipment wheel set parameters] // Zheleznodorozhny transport. 2010. № 7. P. 52-53.
10. A.P. Buynosov. Novyj grebnesmazyvatel' tverdogo tipa // Zheleznodorozhny transport. 2011. № 10. P. 52-53.