

**МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СТАНЦИЙ В ТРАНСПОРТНОМ УЗЛЕ**

**ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИЗЛОМОВ
И ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЛЬСОВЫМИ ЦЕПЯМИ**

**ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
ТУПИКОВЫХ ПАССАЖИРСКИХ СТАНЦИЙ**

**РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ
ПО ПЕРЕЛОМУ МАССЫ СОСТАВА**



**УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ
ПРИМЕНЕНИЕм БЕНЗИНА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОПРИСАДКОЙ**

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ
СНИЖЕНИЯ УРАВНИТЕЛЬНОГО ТОКА В ТЯГОВОЙ СЕТИ**



МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
13. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal «Transport of the Urals», Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
5. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
9. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
10. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
11. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
12. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
13. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

П. А. Козлов, С. П. Вакуленко, В. П. Козлова.
Модель адаптивного взаимодействия станций в транспортном узле 3

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

М. Л. Попова, А. Н. Попов, С. В. Бушуев. Оценка вероятностей возникновения изломов и их выявления рельсовыми цепями **8**

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

В. М. Курганов, М. В. Грязнов, Е. А. Тимофеев.
Фактор времени в ситуационном управлении автомобильными перевозками живой птицы 15

Е. Д. Псеровская, А. П. Грешенштейн.
Оценка эффективности распределительного центра при разных вариантах консолидации грузопотоков 22

А. В. Колин, А. А. Бакин. Подходы к повышению пропускной способности тупиковых пассажирских станций **28**

А. В. Мартыненко, Е. Г. Филиппова.
Моделирование пространственного распределения междугородных автомобильных поездок на основе данных сервисов карпулинга 33

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

Е. В. Козеев, О. С. Самошкин, Е. Н. Попов, В. Е. Волков.
Разработка и испытания датчиков повышенной надежности для системы контроля нагрева букс 39

В. А. Ханис, С. В. Беспалько, И. А. Ключиков, А. Л. Ханис, А. А. Ханис.
Модель обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов в электрических сетях пассажирских вагонов на основе применения волоконно-оптических датчиков 46

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

М. В. Башаркин, А. Г. Исачева. Особенности токораспределения в тяговой рельсовой сети при тяжеловесном движении **52**

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В. А. Подвербный, П. Н. Холодов.
Расчет эксплуатационных расходов по перелому массы состава 59

Т. Н. Асалханова, А. А. Осколков. Организация транспортного производства путевых работ с учетом информационного моделирования **65**

Я. А. Швец, А. Ю. Журавлев. Грузоподъемность столбчатых опор железнодорожных мостов, запроектированных по принципу I на многолетнемерзлых грунтах **68**

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Е. Р. Магарил. Улучшение параметров эксплуатации автомобилей применением бензина, модифицированного наноприсадкой **75**

В. А. Буйвис, А. В. Новичихин. Распределение ресурсов в автодорожном комплексе: механизм возврата инвестиций (на примере Новокузнецка) **80**

А. В. Соколов, А. В. Маркелов, В. А. Масленников, Д. А. Устинов.
Экспериментальное обоснование целесообразности совершенствования методики проектных расчетов дорожных автозаправочных станций 86

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

А. П. Буйносов, Е. С. Юдт, А. А. Францкевич.
Влияние скорости кинетического проскальзывания колеса на коэффициент сцепления колеса с рельсом 90

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

В. Н. Ли, Ю. А. Константинова, А. М. Константинов.
Система автоматического управления устройством снижения уравнильного тока в тяговой сети 93

А. А. Ковалев, С. В. Лобастов.
Исследование проблем настройки дугогасящих реакторов 99

Ю. П. Неугодников, И. П. Неугодников. Анализ энергетической эффективности работы выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций постоянного тока **104**

АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ

А. А. Бородин. Методика расчета дополнительных затрат времени на формирование «барьерных групп» вагонов **109**

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

P. A. Kozlov, S. P. Vakulenko, V. P. Kozlova.
Model of adaptive interaction of stations in transport node 3

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

M. L. Popova, A. N. Popov, S. V. Bushuev. Assessment of probabilities of rail failures and their detection by rail circuits **8**

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

V. M. Kurganov, M. V. Gryaznov, E. A. Timofeev.
The time factor in the situational management of road transport of live poultry 15

E. D. Pserovskaya, A. P. Grefenshteyn.
Approaches to increase capacity of dead-end passenger stations 22

A. V. Kolin, A. A. Bakin.
Modeling of spatial distribution of intercity automobile trips on the basis of carpooling services data 28

A. V. Martynenko, E. G. Filippova.
Modeling of spatial distribution of intercity automobile trips on the basis of carpooling services data 33

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

E. V. Kozeev, O. S. Samoshkin, E. N. Popov, V. E. Volkov.
Development of tests of increased reliability sensors for inspection system of axle box heating 39

V. A. Khanis, S. V. Bespalko, I. A. Klyuchikov, A. L. Khanis, A. A. Khanis.
Model for detecting and evaluating the fire hazard of spark discharges in the electrical networks of passenger cars based on the use of fiber-optic sensors 46

ROLLING STOCK AND TRACTION

M. V. Basharkin, A. G. Isaycheva. Features of current distribution in the traction rail network for heavy-haul traffic **52**

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

V. A. Podverbnyy, P. N. Kholodov.
Calculation of operating costs on change of train weight 59

T. N. Asalkhanova, A. A. Oskolkov. Organization of transport production of permanent way work with the consideration for information modeling **65**

Ya. A. Shvets, A. Yu. Zhuravlev. Carrying load of column poles of railway bridges that are designed according the I-st principle on permafrost ground **68**

MOTOR TRANSPORT

E. R. Magaril. Improvement of vehicles operation by application of gasoline modified with nano-additive **75**

V. A. Buyvis, A. V. Novichikhin. Distribution of resources in the road complex: the mechanism of return on investments (on the example of Novokuznetsk) **80**

A. V. Sokolov, A. V. Markelov, V. A. Maslennikov, D. A. Ustinov.
Experimental substantiation of expediency for improvement of method for project calculations of gas stations 86

ELECTRIC TRACTION

A. P. Buynosov, E. S. Yudt, A. A. Frantskevich.
Influence of kinetic slip speed of a wheel on a wheel-rail friction coefficient 90

ELECTRIC SUPPLY

V. N. Li, Yu. A. Konstantinova, A. M. Konstantinov.
Automatic control system of device for reducing equalizing current in traction network 93

A. A. Kovalev, S. V. Lobastov.
Study of configuration problems of arc-suppression coils 99

Yu. P. Neugodnikov, I. P. Neugodnikov.
Energy efficiency analysis of operation of rectifying and inverter transformers for direct current traction substations 104

RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS

A. A. Borodin. Method for calculation of additional time consumption on making-up of «barrier car groups» **109**

УДК 656.078

Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга «СТРАТЕГ», Москва, Россия,
Сергей Петрович Вакуленко, кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий РУТ (МИИТ), Москва, Россия,
Валерия Петровна Козлова, доктор экономических наук, ведущий специалист научно-производственного предприятия «Транспортный алгоритм», Москва, Россия

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАНЦИЙ В ТРАНСПОРТНОМ УЗЛЕ

Petr Alexeevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia,
Sergey Petrovich Vakulenko, PhD in Engineering, Professor, Head of Institute of Operation and Digital Technologies, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
Valeriya Petrovna Kozlova, DSc in Economics, Principal Specialist of Research Company «Analytical and controlling systems on transport», Moscow, Russia

Model of adaptive interaction of stations in transport node

Аннотация

Статья посвящена организации адаптивной работы в транспортном узле. В качестве примера рассматривается транспортный узел Усть-Луга, включающий сортировочную станцию и шесть припортовых.

Адаптивное взаимодействие заключается в следующем. Сортировочная станция может готовить передаточные поезда на припортовые станции в двух вариантах — с детальной подборкой групп по причалам или без нее. В первом случае сортировочная станция выполняет дополнительные работы, но общее время доставки груза сокращается. В зависимости от ситуации передачи готовятся в том или ином варианте.

В статье предложена модель адаптивного взаимодействия, которая выбирает оптимальный вариант для всех условий. Модель может служить основой для построения адаптивной работы транспортного узла.

Ключевые слова: транспортный узел, адаптация, модель, станция.

Summary

The paper is devoted to organization of adaptive operation in a transport node. As an example, the authors consider the Ust-Luga transport node that includes a marshalling station and six port stations.

The adaptive interaction includes the following. The marshalling station is able to prepare transfer trains to port stations in two variants — with a detailed selection of car sets by berths and without it. In the first case, the marshalling station executes additional operations, but the delivery time reduces. In dependence to the situation car sets are prepared in one way or another.

The paper suggests a model of adaptive interaction that selects an optimal variant for all conditions. The model can become a basis for creation of adaptive operation of the transport node.

Keywords: transport node, adaptation, model, station.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-3-7

Транспортный узел как система имеет общеузловую функцию и механизмы ее активного поддержания. Последнее обеспечивается адаптивной технологией, которая придает станции устойчивость при случайных внешних воздействиях. Ранее уже было отмечено [1, 2], что системный подход может применяться в полной мере только к промышленным и припортовым транспортным узлам.

Рассмотрим процессы адаптивного взаимодействия станций на примере припортового узла Усть-Луга (рис. 1).

В припортовом узле основное взаимодействие происходит между сортировочной и припортовыми станциями. Взаимодействие припортовых станций между собой незначительное, поэтому в статье не рассматривается.

Проанализируем адаптивное взаимодействие сортировочной станции с одной из припортовых. Здесь возникает два адаптивных процесса:

гибкое перенесение сортировочной работы с сортировочной станции на припортовую и наоборот;

гибкое перенесение процесса накопления с одной станции на другую.

ПЕРВЫЙ АДАПТИВНЫЙ ПРОЦЕСС

Сортировочная станция может готовить партии вагонов на припортовые станции по двум вариантам:

многогруппные передачи — с подборкой групп по специализации причалов;

одноручные — без подборки.

Первый вариант

Дополнительная работа по формированию (подборка вагонов по грузовым фронтам припортовой станции) происходит на сортировочной станции, что имеет свои плюсы и минусы.

Плюсы: уменьшается работа по расформированию (подформированию) групп вагонов на припортовой станции для подачи по отдельным причалам, сокращается суммарное время продвижения потока от начала формирования на сортировочной станции до подачи вагонов на грузовые фронты (подборка вагонов по фронтам на сортировочной станции происходит в разы быстрее, чем на припортовой, так как в данном случае используется сортировочная горка).

Минусы: дополнительно загружаются горловина и вытяжные пути на сортировочной станции, формирование многогруппных передач одновременно на все припортовые станции невозможно — не хватит пропускной (перерабатывающей) способности сортировочной станции; дополнительно заняты маневровые локомотивы; возрастает время нахождения вагонов на сортировочной станции.

Второй вариант

Сортировочная станция отправляет одnogруппную передачу. Подборка по фронтам происходит на припортовой станции.

Плюсы: сортировочная станция освобождается от дополнительной работы, уменьшается загрузка горки, горловин и локомотивов, станция может эффективнее выполнять остальную работу.

Минусы: значительно увеличивает время продвижения потока от начала формирования передачи на сортировочной станции до подачи вагонов на грузовые фронты.

ВТОРОЙ АДАПТИВНЫЙ ПРОЦЕСС

Если вагоны прибыли намного раньше, чем подойдет судно, то они где-то должны простаивать. Здесь тоже возможны два варианта.

Первый вариант

Вагоны простаивают на сортировочной станции.

Плюсы: припортовая станция, у которой вместимость путей весьма ограничена, может без особых проблем заниматься сортировочной работой (например, по уборке вагонов с фронтов и формированию передачи на сортировочную станцию).

Минусы: дополнительные вагоны на сортировочной станции, особенно для

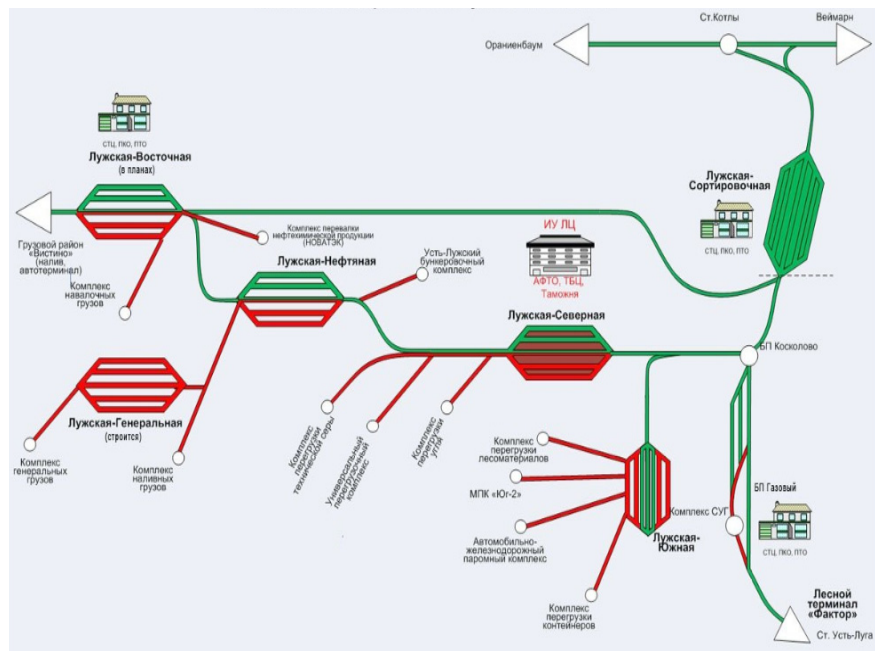


Рис. 1. Схема транспортного узла Усть-Луга

нескольких припортовых одновременно, снижают маневренность станции и эффективность ее работы.

Второй вариант

Вагоны простаивают на припортовой станции.

Плюсы: сортировочная станция освобождается от излишних вагонов, ее маневренность и производительность повышается.

Минусы: производительность припортовой станции сокращается из-за снижения маневренности.

Таким образом, для обоих вариантов характерны и плюсы, и минусы. Но каждый из них имеет преимущество в разных ситуациях.

Первая ситуация

Судно прибывает не скоро. Вагоны находятся на сортировочной станции. Технологически целесообразно перенести сортировочную работу на припортовую станцию, так как она не занята и может спокойно, хоть и медленно, подбирать вагоны по фронтам. Особых минусов в этом нет. Иначе станция простаивала бы без работы. Но при этом разгружается сортировочная станция, производительность и эффективность ее работы повышается.

Вторая ситуация

Судно уже прибыло или прибывает скоро. Задержка судна обходится очень дорого. Следовательно, необходимо ускорить прохождение потока до причалов и сортировочную работу целесообразнее выполнять на сортировочной станции.

Итак, адаптивное взаимодействие заключается в перенесении сортировочной работы и процессов ожидания с одной станции на другую (рис. 2). На рис. 2 каналами отображены любые устройства на станциях, где выполняется технологическая операция, а бункерами — любые накопители (резервные пути, склады и пр.), т.е. станции как бы помогают друг другу.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АДАПТИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В транспортном узле может возникать большое множество расчетных ситуаций, что обусловлено следующими причинами:

ритм прибытия вагонов с грузами для тех или иных причалов меняется, значит, возникает различный набор грузов на сортировочной станции для тех или иных станций и для различных грузовых фронтов;

суда подходят неравномерно; на начало расчета имеется большая или меньшая загрузка сортировочной и припортовых станций.

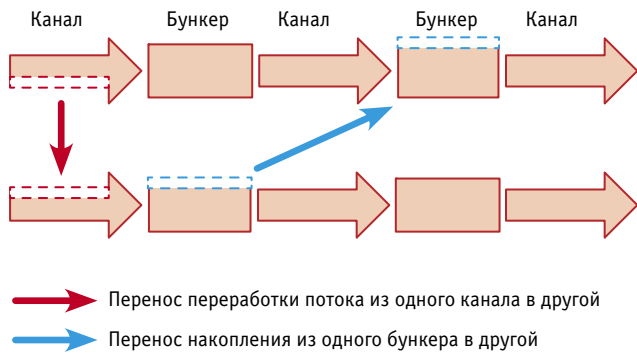


Рис. 2. Схема адаптивного взаимодействия станций в транспортном узле

Соответственно для расчета оптимального динамического процесса адаптивного взаимодействия необходима динамическая оптимизационная модель, которую можно построить на основе динамической транспортной задачи [1]. Схему отображения процессов в модели адаптивного взаимодействия представим следующим образом (рис. 3).

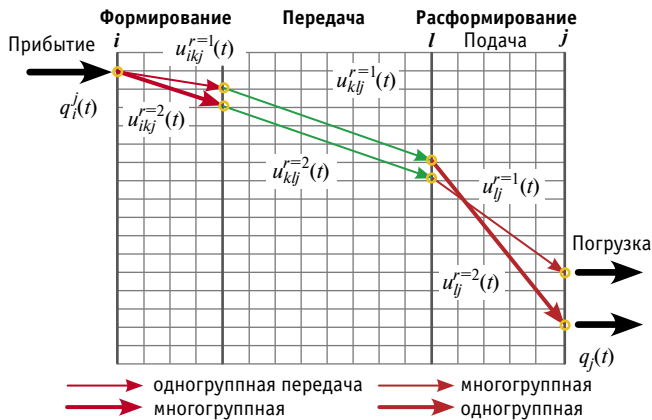


Рис. 3. Схема модели адаптивного взаимодействия

На рис. 3 отображены:
 процесс прибытия груза $q_i^j(t)$;
 формирование груза на сортировочной станции $u_{ikj}^r(t)$;
 процесс движения потока от сортировочной станции к припортовой $u_{klj}^r(t)$;
 процесс расформирования на припортовой станции $u_{ljj}^r(t)$;
 грузовая операция $q_j(t)$.
 Сортировочная работа может быть распределена по двум вариантам:
 формирование многогруппной передачи на сортировочной станции (толстая стрелка), вариант $r = 1$, и одногруппной (тонкая стрелка), вариант $r = 2$;
 расформирование на припортовой станции состава с подобранными группами (тонкая стрелка), вариант $r = 1$, и одногруппного состава (толстая стрелка), вариант $r = 2$.
 Везде толстая стрелка означает дополнительную работу.

Из рис. 3 видно, что по варианту $r = 2$, когда подбор групп осуществляется на сортировочной станции, груз доставляется к причалам значительно быстрее.

Перераспределение ожидания показано на рис. 4. Партия может отправляться по готовности на припортовую станцию и ожидать там прибытия судна (зеленая стрелка), либо вагоны будут ждать на сортировочной станции (красная стрелка).

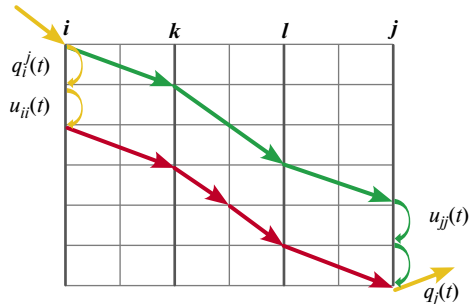


Рис. 4. Перераспределение процессов ожидания

В модели адаптивного взаимодействия вводится обратная дуга $w_j(t)$, означающая величину ущерба от задержки грузовой операции при опоздании груза (рис. 5).

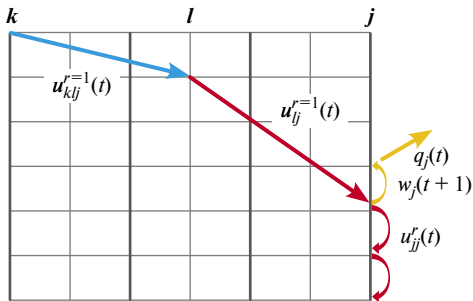


Рис. 5. Схема отображения ущерба от опоздания груза

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В качестве критерия принимаем минимум затрат на пропуск и преобразование потока

$$\sum_t \sum_j u_{ii}^j(t) C_{ii}^j + \sum_t \sum_j \sum_r u_{ikj}^r(t) C_{ikj}^r + \sum_t \sum_j \sum_r u_{kkj}^r(t) C_{kkj}^r +$$

$$+ \sum_t \sum_j \sum_r u_{ljj}^r(t) C_{ljj}^r + \sum_t \sum_j \sum_r u_{ljj}^r(t) C_{ljj}^r + \sum_t \sum_j \sum_r u_{ljj}^r(t) C_{ljj}^r +$$

$$+ \sum_t \sum_j w_j(t) C_j \rightarrow \min,$$

где C — стоимостные параметры;
 $\sum_t \sum_j u_{ii}^j(t)$ — груз на сортировочной станции, ожидающий формирования;
 $\sum_t \sum_j \sum_r u_{ikj}^r(t)$ — груз в процессе формирования по варианту r для j -й припортовой станции;

$\sum_t \sum_j \sum_r u_{kkj}^r(t)$ — груз, сформированный на сортировочной

станции по варианту r для j -й припортовой станции, ожидающий отправления;

$\sum_t \sum_j \sum_r u_{ijj}^r(t)$ — сформированный по варианту r груз, ожи-

дающий расформирования на j -й припортовой станции;

$\sum_t \sum_j \sum_r u_{ij}^r(t)$ — сформированный по варианту r груз в про-

цессе расформирования на j -й припортовой станции;

$\sum_t \sum_j \sum_r u_{ij}^r(t)$ — расформированный по варианту r груз,

ожидающий на j -й припортовой станции погрузки на судно;

$\sum_t \sum_j w_j(t)$ — груз на j -й припортовой станции, опоздавший

к погрузке.

Ограничения

По перерабатывающей способности сортировочной станции

$$\forall t \left| \sum_j \sum_r u_{ikj}^r(t) \leq U_i. \right.$$

По перерабатывающей способности припортовой станции

$$\forall t \left| \sum_j \sum_r u_{ij}^r(t) \leq U_j. \right.$$

По вместимости парка на сортировочной станции для ожидания формирования

$$\forall t \left| \sum_r \sum_j u_{ii}^{jr}(t) \leq U_{ii}. \right.$$

По вместимости парка на сортировочной станции для ожидания отправления

$$\forall t \left| \sum_r \sum_j u_{kkj}^r(t) \leq U_{kk}. \right.$$

По вместимости парка на j -й припортовой станции для ожидания расформирования

$$\forall t \left| \sum_r \sum_j u_{ij}^r(t) \leq U_{ij}. \right.$$

По вместимости парка на j -й припортовой станции для ожидания погрузки

$$\forall t \left| \sum_r u_{ij}^r(t) \leq U_{ij}. \right.$$

Балансные уравнения

Процесс ожидания формирования партии груза, прибывшей на сортировочную станцию для j -й припортовой станции:

$$u_{ii}^j(t+1) = u_{ii}^j(t) + q_i^j(t) - \sum_r u_{ikj}^r(t);$$

процесс ожидания отправления партии груза, сформированной на сортировочной станции по варианту r для j -й припортовой станции:

$$u_{kkj}^r(t+1) = u_{kkj}^r(t) + u_{ikj}^r(t \cdot \tau_{ikj}^r) - u_{kij}^r(t);$$

процесс ожидания расформирования на j -й припортовой станции партии груза, сформированной по варианту r :

$$u_{ij}^r(t+1) = u_{ij}^r(t) + u_{kij}^r(t \cdot \tau_{kij}^r) - u_{ij}^r(t);$$

процесс ожидания погрузки по варианту r партии груза на j -й припортовой станции:

$$u_{ij}^r(t+1) = u_{ij}^r(t) + u_{ij}^r(t \cdot \tau_{ij}^r) - q_j(t) + w_j(t+1) - w_j(t),$$

где $u_{ii}^j(t)$ — партия груза в процессе ожидания формирования на сортировочной станции;

$q_i^j(t)$ — прибывшая на сортировочную станцию партия груза для j -й припортовой станции;

$u_{ikj}^r(t)$ — партия груза на сортировочной станции в процессе формирования по варианту r для j -й припортовой станции;

$u_{kkj}^r(t)$ — партия груза, сформированная по варианту r для j -й припортовой станции, в процессе ожидания отправления на сортировочной станции;

$u_{kij}^r(t)$ — партия груза в процессе формирования на сортировочной станции по варианту r для j -й припортовой станции;

τ_{ikj}^r — время формирования на сортировочной станции по варианту r для j -й припортовой станции;

$u_{kij}^r(t)$ — партия груза по варианту r в процессе движения от сортировочной станции к j -й припортовой;

$u_{ij}^r(t)$ — партия груза в процессе ожидания расформирования на j -й припортовой станции;

τ_{kij}^r — время движения от сортировочной станции к j -й припортовой;

$u_{ij}^r(t)$ — партия груза по варианту r в процессе расформирования на j -й припортовой станции;

$u_{ij}^r(t)$ — партия груза по варианту r в процессе ожидания погрузки на j -й припортовой станции;

τ_{ij}^r — время расформирования по варианту r на j -й припортовой станции;

$q_j(t)$ — партия груза, погруженная на j -й припортовой станции;

$w_j(t)$ — партия груза, опоздавшая к погрузке на j -й припортовой станции в момент t .

Модель можно решать с помощью однопродуктовой динамической транспортной задачи [3, 4], когда для каждого варианта задается собственный маршрут с собственными параметрами потока (рис. 6, верхняя и нижняя линии).

Но модель может решаться и как многопродуктовая динамическая транспортная задача. Здесь оба потока с разными индексами идут по одним и тем же дугам (рис. 7).

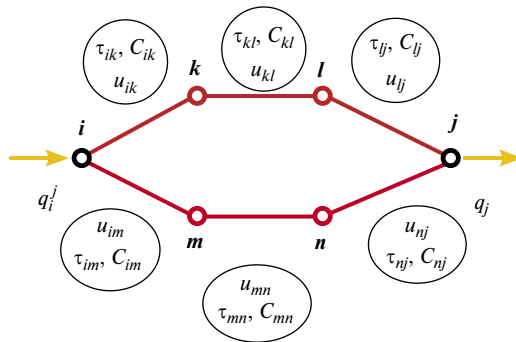


Рис. 6. Представление многопродуктового потока в виде двух однопродуктовых

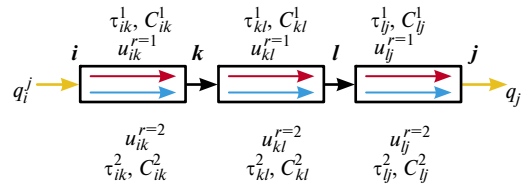


Рис. 7. Представление модели в виде многопродуктовой транспортной задачи

Модель будет выбирать оптимальный динамический процесс адаптивного взаимодействия в транспортном узле. Расчеты, полученные с помощью потоковой модели, в дальнейшем следует проверять на имитационной модели [5], однако эти материалы требуют отдельной публикации.

Литература

1. Козлов П. А. О системах и системности на транспорте // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. ISSN 1815–9400.
2. Козлов П. А. Системные исследования — новый подход // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 46–50. ISSN 2074–9325.
3. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. № 3. С. 521–531. ISSN 0424–7388.
4. Козлов П. А., Миловидов С. П. Распределительная динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1983. № 5. С. 36–38. ISSN 0002–3388.
5. Имитационная экспертиза проекта развития транспортного узла Усть-Луга / П. А. Козлов, И. П. Владимирская, И. В. Иванов, О. В. Осокин // Транспорт Российской Федерации. 2009. № 6 (25). С. 18–21. ISSN 1994–831X.

References

1. Kozlov P. A. On systems and systemacy of transport [O sistemakh i sistemnosti na transporte] // Transport of the Urals. 2016. No. 2 (49). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. ISSN 1815–9400.
2. Kozlov P. A. System studies — new approach [Sistemnye issledovaniya — novyy podkhod] // Science and technology in transport. 2014. No. 1. Pp. 46–50. ISSN 2074–9325.
3. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimization of transport flows structure in flow dynamics at the priority of consumers [Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebitелей] // Economics and Mathematical Methods. 1982. Vol. XVIII. No. 3. Pp. 521–531. ISSN 0424–7388.
4. Kozlov P. A., Milovidov S. P. A distribution dynamic transportation problem with delays in the network statement [Raspredeitel'naya dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami v setevoy postanovke] // Soviet Journal of Computer and Systems Sciences. 1983. No. 5. Pp. 36–38. ISSN 0002–3388.
5. Simulation examination of the development project of the Ust-Luga transport node [Imitatsionnaya ekspertiza proekta razvitiya transportnogo uzla Ust'-Luga] / P. A. Kozlov, I. P. Vladimirskaia, I. V. Ivanov, O. V. Osokin // Transport of the Russian Federation. 2009. No. 6 (25). Pp. 18–21. ISSN 1994–831X.

Объем статьи 0,47 авторских листа

УДК 656.259.9:625.14:519.2

Мария Леонидовна Попова, инженер НИЛ «Компьютерные системы автоматизи-
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Антон Николаевич Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь
на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС),
Екатеринбург, Россия,

Сергей Валентинович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь
на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС),
Екатеринбург, Россия

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИЗЛОМОВ И ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЛЬСОВЫМИ ЦЕПЯМИ

Mariya Leonidovna Popova, Engineer, Research Laboratory «Computer Systems of Automation»,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Anton Nikolaevich Popov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics
and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Sergey Valentinovich Bushuev, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics
and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Assessment of probabilities of rail failures and their detection by rail circuits

Аннотация

Рассмотрена возможность более широкого использования на объектах ОАО «РЖД» альтернативных средств контроля свободности участков пути. Чтобы исключить снижение безопасности перевозочного процесса, предложено при оборудовании альтернативными средствами учитывать подверженность путевого участка к образованию изломов, а также влияние рельсовых цепей и эксплуатационных мероприятий на выявление изломов и предотвращение крушений.

Ключевые слова: рельсовые цепи, контрольный режим работы, излом рельса, неразрушающий контроль, острodefектный рельс, вероятность крушений.

Summary

The paper considers a possibility of a wider use of alternative means for control of track sections in occupation on the JSC «RZD» objects. In order to exclude the decrease of operation safety the authors propose to consider the exposure of a track section to rail failures at equipping with alternative means of their detection, as well as the influence of rail circuits and operational measures on detecting failures and prevention of crashes.

Keywords: rail circuits, control operating mode, rail failure, nondestructive inspection, critical faulty rail, crash probability.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-8-14

ВВЕДЕНИЕ

На российских железных дорогах в качестве основных средств контроля свободности участков пути применяются рельсовые цепи, эксплуатация которых требует значительных затрат. Повсеместное использование рельсовых цепей обусловлено их способностью определять факт излома или изъятия рельсов, т.е. предотвращать крушения. Альтернативными средствами, позволяющими отслеживать вступление и освобождение подвижным составом путевого участка, являются системы счета осей (ССО). Однако, поскольку ССО не определяют изломы рельсов, их применение на объектах ОАО «РЖД» имеет ограниченный характер. Помимо перечисленных средств, в настоящее время проводятся исследования по созданию систем контроля движения поездов на основе акустического зондирования [1–4].

Угрозу безопасности перевозочного процесса представляют не только изломы, но и образованные в пути острые дефекты рельсов (ОДР). Такие повреждения не вызывают разрушение контакта для протекания сигнального тока и контрольным режимом не определяются, т.е. рельсовые цепи не предотвращают образование изломов.

Для обнаружения ОДР и предотвращения образования изломов выполняется неразрушающий контроль пути, а повреждения, не зафиксированные рельсовыми цепями, выявляет обслуживающий персонал или бригада локомотива при проследовании состава. Случается, что машинист определяет изломы по характерным толчкам в пути и специфическому звуку колес [5, 6].

В связи с тем что рельсовые цепи не обеспечивают полную безопасность перевозочного процесса, авторы данной статьи в работах [7–9] предложили более широко использовать на объектах ОАО «РЖД» альтернативные средства контроля свободности участков пути. Для обеспечения минимального риска возникновения крушений проведено исследование, по результатам которого установлено влияние эксплуатационных параметров участков пути на образование ОДР и изломов [8, 9]. Поскольку крушения, возникающие при образовании изломов, можно предотвратить не только за счет использования рельсовых цепей, но и за счет выполнения дополнительных мероприятий, то при оборудовании путевого участка альтернативными средствами тоже необходимо учитывать их общее влияние на безопасность перевозочного процесса. Поэтому цель исследования, представленного в статье, заключалась в оценке влияния контрольного режима и проводимых мероприятий на предотвращение аварийных ситуаций, возникающих при образовании изломов.

Чтобы оценить влияние рельсовых цепей и выполняемых мероприятий на обеспечение безопасности перевозочного процесса, требовалось исследовать их эффективность и определить вероятность создания на путях ОАО «РЖД» аварийных ситуаций. При определении вероятностей создания аварийных ситуаций необходимо учитывать все события, которые могут привести к образованию изломов и возникновению крушений.

В модели, представленной на рис. 1, показаны события, которые происходят при выполнении мероприятий, направленных на предотвращение образования изломов и возникновение крушений. Изломы рельсов образуются при проследовании состава по ОДР, поэтому в качестве исходного множества наблюдений в рассматриваемой модели учитывались дефекты, отображенные в области A .

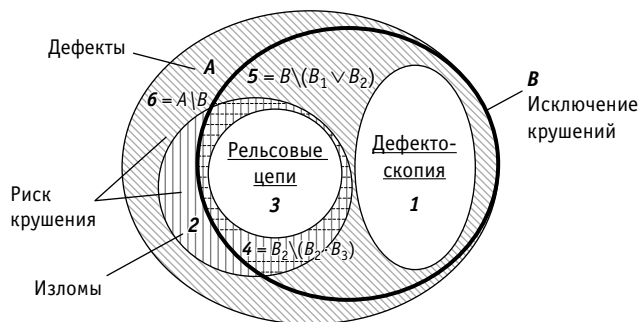


Рис. 1. События, происходящие при выполнении мероприятий, направленных на предотвращение образования изломов и возникновения крушений

Для более удобного исследования множество наблюдений разделено на две группы, объединяющие события по общему признаку (см. рис. 1). В первой группе B учитывались события, возникновение которых исключает образование крушений. В свою очередь, в оставшейся группе \bar{B} рассматривались события, появление которых приводит к образованию аварийных ситуаций. Возникновение каждого события в выделенных группах сопровождается объединением подмножества наблюдений в отдельные области. При этом в зависимо-

сти от подверженности пути к образованию ОДР и в зависимости от эффективности выполнения мероприятий исходное множество наблюдений A и выделяемые области принимают свои размеры.

Из представленной модели видно, что для предотвращения образования изломов и возникновения аварийных ситуаций в исследуемом множестве B описывается возникновение пяти событий. Возникновением первого события (B_1) учитывается выделение области тех ОДР, которые выявлены с использованием средств дефектоскопии. При выполнении неразрушающего контроля пути обнаруживаются не все ОДР, и возникновением второго события (B_2) объединяются дефекты, вызывающие образование изломов. Произошедшие под движущимся составом изломы могут привести к проваливанию колеса в колею, поэтому область дефектов, учитываемых при возникновении второго события, расположена с охватом двух рассматриваемых подмножеств. Использование рельсовых цепей описывается третьим событием и сопровождается выделением области изломов, произошедших с полным раскрытием (B_3). В отдельной области, соответствующей возникновению четвертого события, показаны повреждения (B_4), не зафиксированные контрольным режимом, но выявленные обслуживающим персоналом и при проследовании бригадой локомотива. Возникновением пятого события объединяются ОДР (B_5), обнаруженные персоналом при выполнении осмотра путей.

Создание аварийных ситуаций рассматривается в подмножестве \bar{B} и описывается появлением шестого события. Возникновением шестого события объединяются ОДР и изломы, образование которых не выявляется ни контрольным режимом, ни персоналом.

Согласно рассматриваемой модели, образованный в пути ОДР может привести к возникновению только одного из шести событий, т.е. выделенные события являются несовместными. Поскольку в модели учитывается описание полной группы несовместных событий, то общая вероятность их возникновения равна единице [10]:

$$\sum_{i=1}^6 P_i = 1, \quad (1)$$

где P_i — вероятность возникновения i -го события.

Из модели видно, что вероятность обнаружения ОДР при выполнении неразрушающего контроля пути $P(B_1)$ определяется отношением числа повреждений, выявленных с использованием средств дефектоскопии ($N_{\text{ОДР.В}}$), к общему числу образованных дефектов ($N_{\text{ОДР.О}}$):

$$P(B_1) = \frac{N_{\text{ОДР.В}}}{N_{\text{ОДР.О}}}. \quad (2)$$

В свою очередь, возможность появления второго события, учитывающего возникновение изломов P_2 , определяется выполнением независимых условий: образованные дефекты не выявляются средствами дефектоскопии \bar{B}_1 и при проследовании подвижного состава приводят к хрупкому разрушению рельсов

B_2 . С учетом выполнения необходимых условий вероятность возникновения второго события описывается выражением

$$P_2(\bar{B}_1 \cdot B_2) = P(\bar{B}_1) \cdot P(B_2). \quad (3)$$

Изломы рельсов происходят при проследовании состава по ОДР, поэтому при определении вероятности возникновения второго события учитывалось количество зафиксированных изломов ($N_{И}$) и образованных дефектов ($N_{ОДР}$):

$$P(B_2) = \frac{N_{И}}{N_{И} + N_{ОДР}}. \quad (4)$$

Возможность появления третьего события, описывающего обнаружение повреждений рельсовыми цепями, определяется произведением вероятностей образования изломов $P(B_2)$ и их выявлением контрольным режимом:

$$P_3(B_2 \cdot B_3) = P(B_2) \cdot \frac{N_{РЦ}}{N_{И}}, \quad (5)$$

где $N_{РЦ}$ — число изломов, выявленных рельсовыми цепями; $N_{И}$ — число образовавшихся изломов.

Возникновением четвертого события учитывается обнаружение изломов обслуживающим персоналом и при проследовании бригадой локомотива. Из рассматриваемой модели видно, что возможность появления события P_4 определяется произведением вероятностей невыявления изломов рельсовыми цепями $P(\bar{B}_3)$ и их обнаружения персоналом $P(B_4)$:

$$P_4(\bar{B}_3 \cdot B_4) = P(\bar{B}_3) \cdot P(B_4 \setminus (B_2 \cdot B_3)), \quad (6)$$

где $P(\bar{B}_3)$ — вероятность невыявления изломов рельсовыми цепями;

$P(B_4 \setminus (B_2 \cdot B_3))$ — вероятность обнаружения изломов, не выявленных рельсовыми цепями, при осмотре путей персоналом.

В работах, посвященных исследованию железнодорожного пути, отмечается, что ОДР выявляются средствами дефектоскопии и обслуживающий персонал может обнаруживать незначительную часть повреждений, выходящих на видимую поверхность рельса [11, 12]. Поскольку выявление дефектов при осмотре — довольно редкое событие, то значение вероятности возникновения пятого события принималось равным нулю и в дальнейшем не учитывалось.

Общая вероятность возникновения рассматриваемых событий равна единице, и возможность создания аварийных ситуаций на путях ОАО «РЖД» определяется по формуле

$$P_6 = 1 - \sum_{i=1}^5 P_i. \quad (7)$$

Таким образом, чтобы оценить вероятность аварийных ситуаций, требовалось определить возможности возникновения рассматриваемых событий. При исследовании были использованы данные из автоматизированной системы ЕКАСУИ и альбо-

мов по изломам рельсов, зафиксированные на сети ОАО «РЖД» за период эксплуатации с 2014 по 2018 г. При анализе данных по возникновению изломов было установлено влияние типа пути на образование ОДР и изломов [8, 9], поэтому в дальнейшем вероятности рассматриваемых событий определялись для путей станций и перегонов отдельно.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И ВЫПОЛНЯЕМЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КРУШЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ИЗЛОМОВ

За рассматриваемый период эксплуатации на сети дорог ОАО «РЖД» образовалось около 200 тыс. ОДР, из которых 444 невыявленных привели к излому. Как видно из рис. 2, преобладающее число ОДР и изломов возникает на главных путях станций и перегонов, что обусловлено воздействием повышенных нагрузок и установленных для проследования более высоких скоростей движения [6, 9, 11, 12].

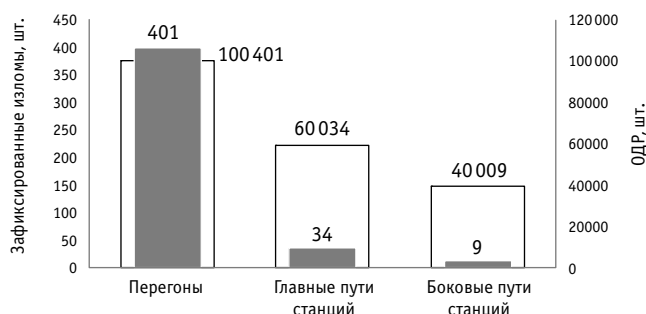


Рис. 2. Количество ОДР и изломов на сети дорог ОАО «РЖД» за период с 2014 по 2018 г.:

□ — ОДР образовано; ■ — зафиксированное число изломов

С использованием выражения (2) и абсолютных значений характеристик, представленных на рис. 2, определены вероятности возникновения ОДР и вероятности их выявления средствами дефектоскопии (рис. 3).

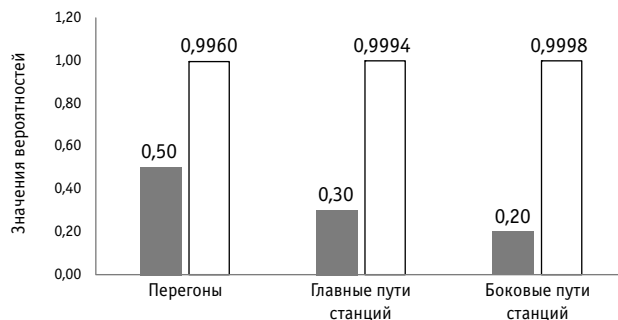


Рис. 3. Вероятности образования ОДР и их выявления средствами дефектоскопии:

■ — вероятность образования ОДР, P_0 ; □ — вероятность выявления ОДР при выполнении неразрушающего контроля пути, P_1

Из полученных результатов (см. рис. 3) видно, что главные пути станций и перегонов наиболее подвержены образованию ОДР, а наименьшая вероятность возникновения дефек-

тов наблюдается на боковых путях станций. Несмотря на разную подверженность путей к образованию ОДР, вероятность обнаружения последних средствами дефектоскопии близка к единице. Высокий показатель выявления ОДР при выполнении неразрушающего контроля пути свидетельствует о высокой эффективности использования средств дефектоскопии.

Для оценки влияния рельсовых цепей на безопасность перевозочного процесса построены графики зафиксированных и выявленных контрольным режимом изломов рельсов (рис. 4).

Из рис. 4а видно, что контрольным режимом ежегодно выявляется около 90% изломов, произошедших на путях перегонов. В свою очередь, на станциях контрольным режимом выявляется около 60% изломов (рис. 4б), зафиксированных на главных путях, и порядка 35% случаев, произошедших на боковых путях (рис. 4в). Значительные показатели выявления контрольным режимом изломов, произошедших на главных путях станций и перегонов, свидетельствуют о высокой эффективности использования рельсовых цепей. На боковых путях станций наблюдается низкая эффективность применения рельсовых цепей, что объясняется возникновением изломов с сохранением контакта для протекания сигнального тока. При выполнении исследования установлено, что на боковых путях из семи не выявленных рельсовыми цепями изломов около 20% (1 излом) произошли с выкрашиванием металла в области болтовых отверстий и порядка 80% случаев (6 изломов) проявились трещинами, выходящими на видимую поверхность шейки и подошвы рельсов.

С использованием выражений (3)–(4) и результатов, представленных на рис. 2 и 4, определены вероятности возникновения изломов и их выявления контрольным режимом (рис. 5).

Как видно из рис. 5, наибольшая вероятность образования изломов наблюдается на главных путях станций и перегонов, а наименьшая — на боковых путях. Несмотря на значительную подверженность к образованию изломов, на главных путях станций и перегонов установлена высокая вероятность их выявления контрольным режимом, что подтверждает эффективность использования рельсовых цепей. С другой стороны, на боковых путях станций обнаружение изломов контрольным режимом имеет минимальную вероятность, что в данном случае свидетельствует о низкой эффективности использования рельсовых цепей.

Из графиков, представленных на рис. 4, также видно, что количество не выявленных рельсовыми цепями изломов значительно преобладает над числом допущенных крушений, т.е. это свидетельствует о высокой эффективности обнаружения изломов персоналом. За рассматриваемый период эксплуатации контрольным режимом не зафиксировано 54 излома (рис. 6), из которых около 70% случаев обнаружены обслуживающим персоналом и бригадой локомотива.

В ходе исследования установлено, что более 60% изломов, не зафиксированных контрольным режимом, были выявлены персоналом при выполнении технического обслуживания устройств. При этом наибольшее число изломов обнаружено на боковых путях станций. Наилучшая выявляемость изломов на боковых путях станций объясняется низкой интенсивностью движения, что позволяет обслуживающему персоналу на протяжении длительного времени находиться вблизи путей и своевременно обнаруживать повреждения.

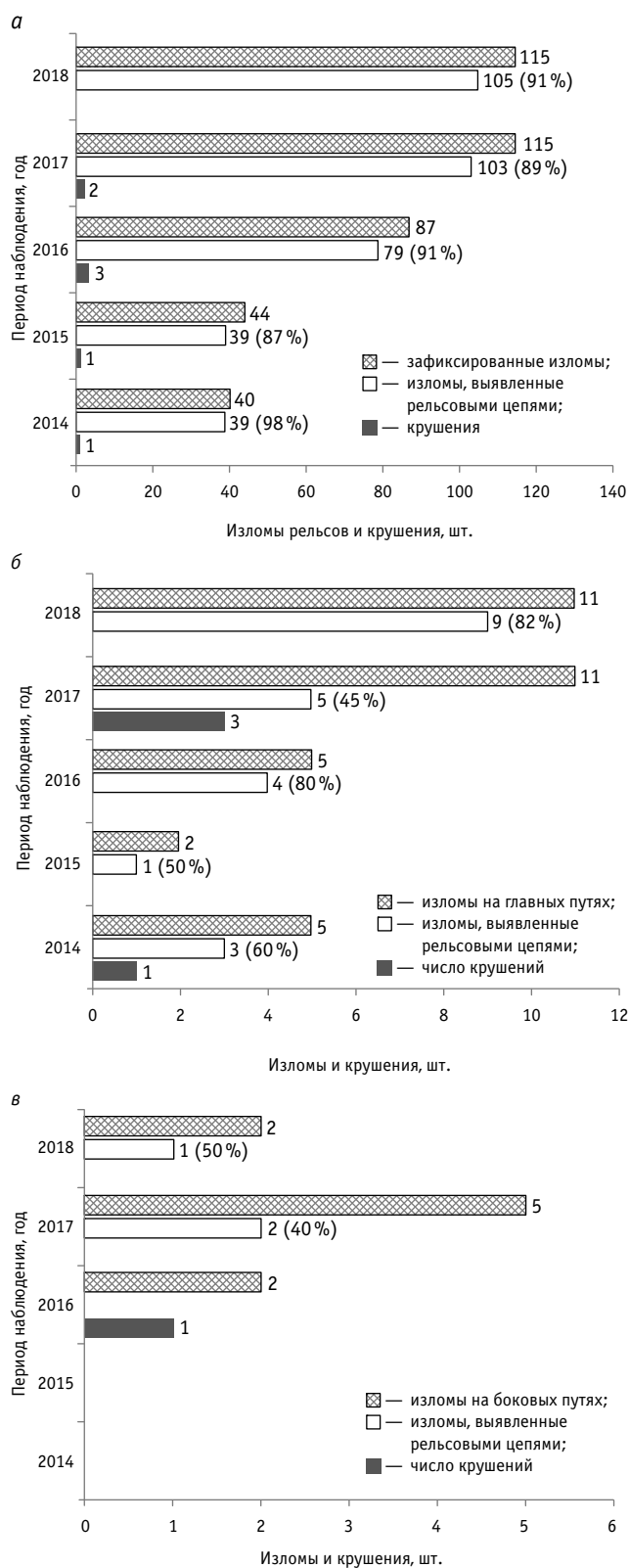


Рис. 4. Зафиксированные и выявленные рельсовыми цепями изломы на путях перегонов (а), на главных (б) и боковых (в) путях станций

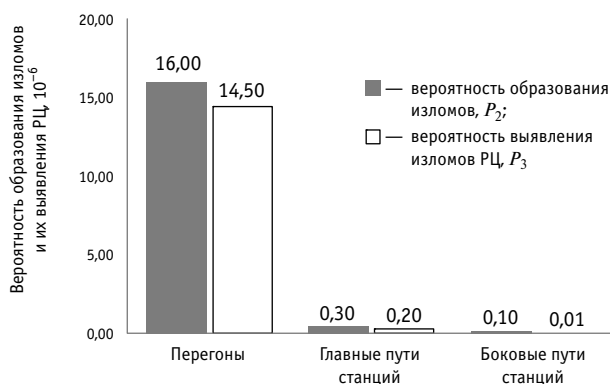


Рис. 5. Вероятности образования изломов и их выявления рельсовыми цепями

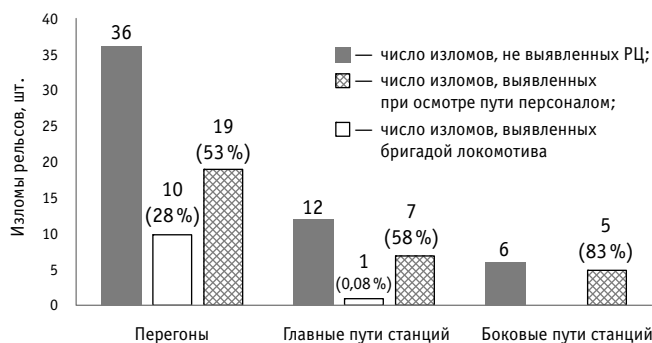


Рис. 6. Обнаружение обслуживающим персоналом и бригадой локомотива изломов, не выявленных контрольным режимом

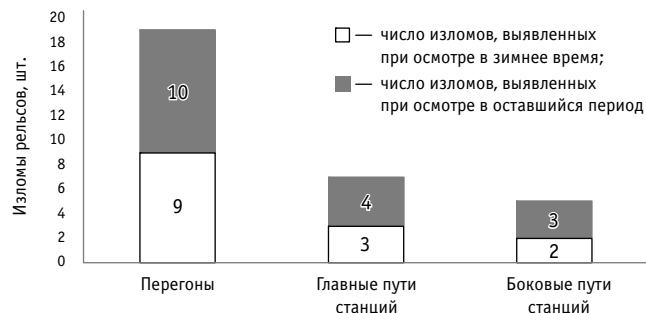


Рис. 7. Обнаружение изломов при осмотре пути в зависимости от времени года

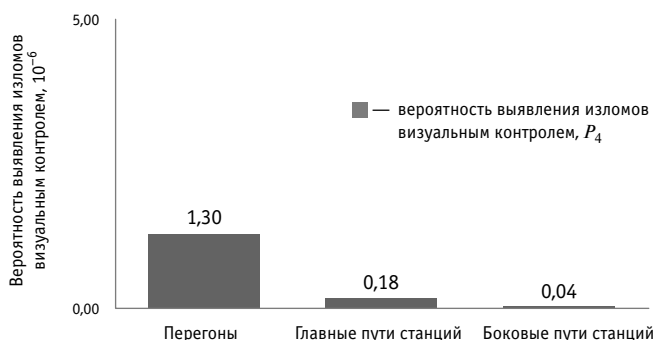


Рис. 8. Вероятности обнаружения изломов, не зафиксированных контрольным режимом, при осмотре путей персоналом

Стоит также отметить, что вне зависимости от времени года и погодных условий обслуживающим персоналом выявляется примерно одинаковое количество изломов (рис. 7), что также подтверждает высокую эффективность обнаружения повреждений при выполнении осмотра путей.

С использованием выражения (5) и результатов, представленных на рис. 7, определены вероятности обнаружения изломов, не зафиксированных контрольным режимом, при выполнении осмотра путей персоналом (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что наибольшая возможность обнаружения персоналом изломов, произошедших без полного раскрытия, наблюдается на главных путях станций и перегонов (что объясняется большим количеством произошедших изломов), а наименьшая — на боковых путях.

В ходе дальнейшего исследования с использованием выражения (7) и установленных вероятностей возникновения рассматриваемых событий определены возможности возникновения на путях ОАО «РЖД» аварийных ситуаций. Для объективной оценки полученных результатов значения вероятностей возникновения рассматриваемых событий объединены по областям накоплений в диаграммы (рис. 9).

Как видно из рис. 9, пути перегонов и главные пути станций наиболее подвержены крушениям, а наименьшая угроза возникновения аварийных ситуаций зафиксирована на боковых путях станций. Наибольшие значения вероятностей крушений, возникающих на главных путях станций и перегонов, объясняются воздействием повышенных нагрузок, вследствие чего образуются более частые изломы, сопровождаемые мгновенным разрушением рельсов на отдельные элементы. Несмотря на значительную подверженность к возникновению изломов и аварийных ситуаций, на главных путях станций и перегонов наблюдается высокая вероятность выявления повреждений рельсовыми цепями. Вероятности обнаружения контрольным режимом изломов, произошедших на главных путях станций и перегонов, существенно превышают значения, установленные при выявлении поврежденный персоналом. В свою очередь, вероятность обнаружения обслуживающим персоналом изломов, произошедших на боковых путях станций, почти в 4 раза больше, чем при использовании рельсовых цепей. То есть это свидетельствует о низкой эффективности применения рельсовых цепей на боковых путях станций.

ВЫВОДЫ

Статья продолжает серию публикаций, посвященных исследованию возможности более широкого использования на объектах ОАО «РЖД» альтернативных средств контроля свободности участков пути без снижения безопасности перевозочного процесса. Для обеспечения минимального риска крушений при оборудовании путевого участка альтернативными устройствами предлагается учитывать влияние рельсовых цепей, средств дефектоскопии и обслуживающего персонала на предотвращение аварийных ситуаций, возникающих при образовании изломов.

В рамках исследования построена модель, описывающая последовательность событий при выполнении в эксплуатации

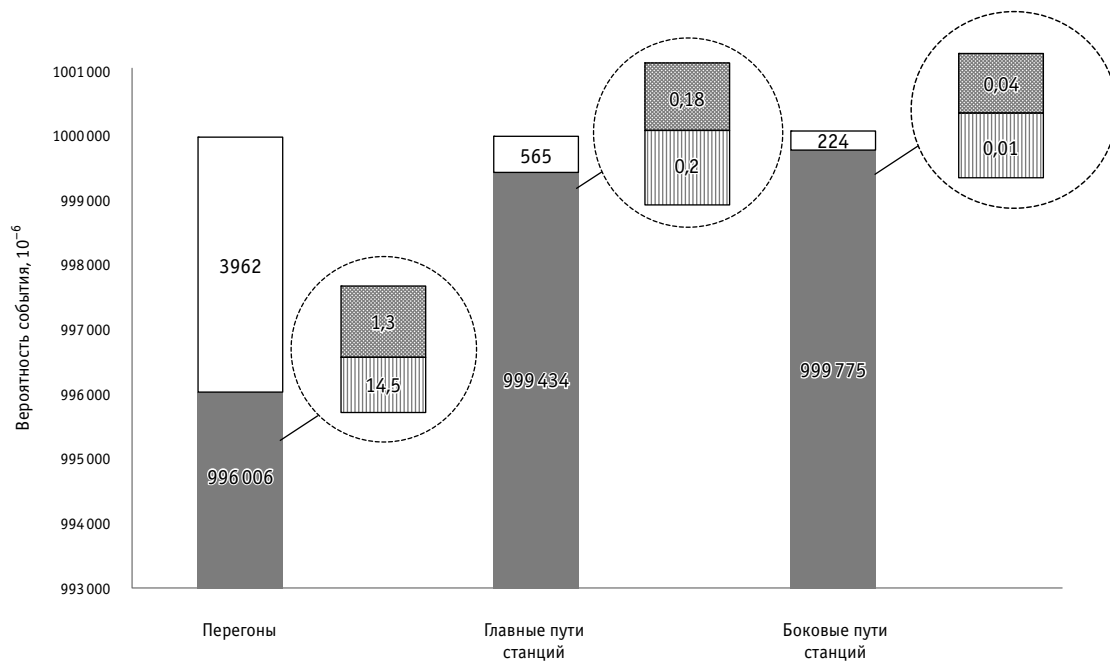


Рис. 9. Накопление вероятностей возникновения событий:

□ — вероятность возникновения крушения, P_6 ; ▨ — вероятность выявления изломов визуальным контролем, P_3 ;
■ — вероятность выявления изломов РЦ, P_3 ; ■ — вероятность выявления ОДР при выполнении неразрушающего контроля, P_1

мероприятий, направленных на предотвращение образования изломов и возникновения крушений, дана численная оценка эффективности и определены вероятности событий, характеризующие влияние рельсовых цепей, средств дефектоскопии и обслуживающего персонала на безопасность перевозочного процесса.

Установлено, что более 90 % ОДР, выявляемых на всей сети дорог ОАО «РЖД», образуются на главных путях станций и на путях перегонов. Несмотря на различную подверженность путей к образованию ОДР, свыше 95 % повреждений выявляются средствами дефектоскопии, что свидетельствует о высокой эффективности их использования.

Контрольным режимом ежегодно выявляется около 90 % изломов, произошедших на путях перегонов, и порядка 65 % случаев, зафиксированных на главных путях станций. При этом вероятность обнаружения контрольным режимом изломов на главных путях станций и перегонов более чем в 2 раза превышает значения, соответствующие выявлению повреждений персоналом, что свидетельствует о высокой эффективности использования рельсовых цепей на главных путях станций и перегонов.

На боковых путях станций контрольным режимом выявляется не более 25 % изломов, что объясняется возникновением изломов с сохранением контакта для протекания сигнального тока. В свою очередь, на боковых путях станций наибольшее количество изломов, не зафиксированных контрольным режимом, обнаруживает обслуживающий персонал. Это объясняется более низкой на боковых путях интенсивностью движения, позволяющей персоналу на протяжении длительного времени находиться вблизи путей и своевременно выявлять

повреждения. В ходе исследования также установлено, что вероятность обнаружения обслуживающим персоналом изломов на боковых путях станций почти в 4 раза выше, чем выявлено контрольным режимом, т.е. в данном случае следует говорить о низкой эффективности рельсовых цепей.

В ходе проведенного исследования установлено, что, несмотря на высокую эффективность использования средств дефектоскопии и рельсовых цепей, главные пути станций и перегонов в наибольшей степени подвержены вероятности возникновения крушений. Это объясняется воздействием повышенных нагрузок, в результате чего под движущимся составом чаще образуются изломы, вызывающие мгновенное разрушение рельсов на отдельные элементы.

Таким образом, поскольку главные пути станций и перегонов наиболее подвержены образованию ОДР, а происходящие по этим дефектам изломы с высокой эффективностью выявляются контрольным режимом, то замена рельсовых цепей на альтернативные средства является недопустимой, потому что приведет к неизбежному снижению безопасности перевозочного процесса.

В свою очередь, поскольку боковые пути в наименьшей степени подвержены образованию дефектов и возникновению изломов, которые выявляются контрольным режимом с низкой эффективностью, то в данном случае использование альтернативных устройств будет целесообразным. Учитывая минимальную угрозу возникновения крушений и высокую эффективность обнаружения обслуживающим персоналом повреждений, можно сделать вывод, что применение альтернативных средств на боковых путях станций не приведет к снижению безопасности перевозочного процесса.

Литература

1. Воронин В. А. Замена рельсовых цепей на аналоги — миф или реальность? // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 16–18. ISSN 0005–2329.
2. Попов А. Н., Галинуров Р. З. Волоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контроля состояния объектов инфраструктуры // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54. ISSN 1815–9400.
3. Rosenberger M., Hall A. Distributed Acoustic Sensing as a base technology for railway applications // Signalling+Datacommunication. 2016. No. (108) 9. Pp. 73–84.
4. Розенберг Е. Н., Батраев В. В. Инновационное развитие систем интервального регулирования // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 7. С. 5–9. ISSN 0005–2329.
5. Прием против излома. URL: <https://gudok.ru/zdr/170/?ID=1346675> (дата обращения: 06.06.2021).
6. В Тындинском районе машинисты обнаружили излом рельса и спасли поезд. URL: <https://blagoveshensk.bezformata.com/listnews/izlom-relsa-i-spasli-poezd/54415219/> (дата обращения: 06.06.2021).
7. Бушуев С. В., Попов А. Н., Попова М. Л. Оценка экономической эффективности средств контроля свободности участков пути // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5. № 2. С. 202–220. ISSN 2412–9186.
8. Бушуев С. В., Попов А. Н., Попова М. Л. Средства контроля свободности участков пути и изломы рельсов // Транспорт Урала. 2020. № 3 (66). С. 43–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-43-50. ISSN 1815–9400.
9. Попова М. Л., Бушуев С. В., Попов А. Н. Анализ влияния эксплуатационных параметров на образование дефектов и изломов с целью внедрения альтернативных систем контроля свободности участков пути // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 6. С. 34–46. ISSN 1997–0722.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва : Наука, 1969. 576 с.
11. Шур Е. А. Повреждения рельсов. Москва : Интекст, 2012. 192 с.
12. Лысюк В. С., Сазонов В. Н., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь : монография. Москва : Академкнига, 2003. 589 с.

References

1. Voronin V. A. Replacement of track circuits with analogues — myth or reality? [Zamena rel'sovykh tsepey na analogi — mif ili real'nost'] // Automation, communication and informatics. 2019. No. 2. Pp. 16–18. ISSN 0005–2329.
2. Popov A. N., Galinurov R. Z. Fiber optic technologies in the automatic train control systems and monitoring of railway infrastructure [Volonno-opticheskie tekhnologii v sistemakh upravleniya dvizheniem poezdov i kontrolya sostoyaniya ob'ektov infrastruktury] // Transport of the Urals. 2018. No. 3 (58). Pp. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54. ISSN 1815–9400.
3. Rosenberger M., Hall A. Distributed Acoustic Sensing as a base technology for railway applications // Signalling+Datacommunication. 2016. No. (108) 9. Pp. 73–84.
4. Rozenberg E. N., Batraev V. V. Innovational development of spacing traffic control systems [Innovatsionnoe razvitiye sistem interval'nogo regulirovaniya] // Automation, communication and informatics. 2018. No. 7. Pp. 5–9. ISSN 0005–2329.
5. Method against failure [Priem protiv izloma]. URL: <https://gudok.ru/zdr/170/?ID=1346675> (access date: 06.06.2021).
6. In the Tynda region locomotive engineers detected a rail failure and saved a train [V Tyndinskom rayone mashinisty obnaruzhili izlom rel'sa i spasli poezd]. URL: <https://blagoveshensk.bezformata.com/listnews/izlom-relsa-i-spasli-poezd/54415219/> (access date: 06.06.2021).
7. Bushuev S. V., Popov A. N., Popova M. L. Evaluation of the economic efficiency of track occupation monitoring means [Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti sredstv kontrolya svobodnosti uchastkov puti] // Automation on Transport. 2019. Vol. 5. No. 2. Pp. 202–220. ISSN 2412–9186.
8. Bushuev S. V., Popov A. N., Popova M. L. Means for track availability check-up and rail failures [Sredstva kontrolya svobodnosti uchastkov puti i izlomly rel'sov] // Transport of the Urals. 2020. No. 3 (66). Pp. 43–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-43-50. ISSN 1815–9400.
9. Popova M. L., Bushuev S. V., Popov A. N. Analysis of the impact of operational parameters on the formation of defects and fractures in order to introduce alternative systems for track occupancy control [Analiz vliyaniya ekspluatatsionnykh parametrov na obrazovanie defektov i izlomov s tsel'yu vnedreniya al'ternativnykh sistem kontrolya svobodnosti uchastkov puti] // Bulletin of transport of the Volga region. 2020. No. 6. Pp. 34–46. ISSN 1997–0722.
10. Venttsel E. S. Probability theory [Teoriya veroyatnostey]. Moscow : Science, 1969. 576 p.
11. Shur E. A. Rail failures [Povrezhdeniya rel'sov]. Moscow : Intext, 2012. 192 p.
12. Lysyuk V. S., Sazonov V. N., Bashkatova L. V. Durable and reliable railway track [Prochnyy i nadezhnyy zheleznodorozhnyy put'] : monograph. Moscow : Akademkniga, 2003. 589 p.

Объем статьи 0,87 авторских листа

УДК 656.137

Валерий Максимович Курганов, доктор технических наук, профессор кафедры экономической теории Тверского государственного университета (ТвГУ), Тверь, Россия,

Михаил Владимирович Грязнов, доктор технических наук, профессор кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова), Магнитогорск, Россия,

Егор Анатольевич Тимофеев, директор по логистике ООО «Ситно-Продукт», Магнитогорск, Россия

ФАКТОР ВРЕМЕНИ В СИТУАЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫМИ ПЕРЕВОЗКАМИ ЖИВОЙ ПТИЦЫ

Valeriy Maximovich Kurganov, DSc in Engineering, Professor, Economic Theory Department, Tver State University (TSU), Tver, Russia,

Mikhail Vladimirovich Gryaznov, DSc in Engineering, Professor, Logistics and Management of Transport Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia,

Egor Anatolyevich Timofeev, Logistics Director, Sitno-Product LLC, Magnitogorsk, Russia

The time factor in the situational management of road transport of live poultry

Аннотация

Обоснована актуальность сокращения задержек при выполнении технологических операций, связанных с перевозками живой птицы автомобильным транспортом. Предложена методика, основанная на ситуационном подходе к организации взаимодействия персонала птицеводческого комплекса, позволяющая оперативно корректировать режимы работы для снижения задержек при погрузке, движении, разгрузке птицевоза и для сокращения времени нахождения птицы в кузове. Методика включает пять этапов: формирование электронной суточной заявки на перевозку, согласование заявки с участниками перевозочного процесса, автоматический расчет параметров ресурсного обеспечения перевозки, онлайн-мониторинг задержек на различных стадиях перевозки, разработку менеджментом оперативных мероприятий по сокращению задержек. Типизированы управленческие решения, позволяющие сократить потери времени при транспортировке. Рассчитан экономический эффект и обоснована целесообразность практической реализации разработанных рекомендаций.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, перевозка живой птицы, ситуационный подход, потери времени при транспортировке.

Summary

The urgency of the problem of reducing delays in the execution of technological operations for the transportation of live poultry by road has been substantiated. The proposed methodology is based on a situational approach to organizing the interaction of the staff of the poultry complex, aimed at promptly adjusting the modes of their work, in order to reduce delays in loading, moving and unloading the poultry vehicle, and the time spent by the bird in its body. The methodology includes five stages associated with the formation of an electronic daily request for transportation and its coordination with the participants of the transportation process, with an automatic calculation of the parameters of resource provision of transportation, with on-line monitoring of delays at its various stages, as well as with the development of management of operational measures to reduce the arising delays. Management decisions to reduce the resulting delays are typified. The economic effect is calculated and the expediency of practical implementation of the proposed recommendations is substantiated.

Keywords: road transport, transportation of live poultry, situational approach, loss of time during transportation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-15-21

Часть общего падежа, существенно влияющего на экономику птицеводческого хозяйства, происходит после окончания выращивания живой птицы — на этапе доставки автомобильным транспортом с бройлерной площадки в цех убоя и переработки. Согласно результатам проведенных исследований [1], задержки при доставке птицы на забой приводят к падежу, достигающему в ряде случаев 10% от перевозимого поголовья. Кроме того, задержки при транспортировке становятся причиной потерь, связанных с простоями или холостой работой линий убоя и переработки, а также с простоями подвижного состава и снижением производительности труда персонала. Исходя из этого можно сделать вывод, что фактор времени играет большую роль в возникновении проблемных ситуаций при транспортировке живой птицы с бройлерных площадок. Устранение этих проблем во многом зависит от степени мотивированности и квалификации персонала.

В настоящее время действует международный стандарт [2], ратифицированный нашей страной, в котором изложены общие руководящие указания по повышению компетентности персонала и его вовлеченности в процессы менеджмента качества. Вместе с тем для повышения эффективности доставки птицы перспективным остается также использование ситуационного подхода.

Необходимо отметить, что одной из первых отечественных разработок, посвященных типизации ситуаций перевозок автомобильным транспортом

по видам управленческих решений, было исследование, выполненное в Московском автомобильно-дорожном институте (МАДИ) [3]. Работы по формированию ситуационного подхода были продолжены в Оренбургском государственном университете [4] и получили развитие в МАДИ применительно к управлению перевозками [5–7].

Ситуационный подход предполагает анализ причинно-следственных связей факторов, которые привели к проблемной ситуации, а также разработку и реализацию типовых управленческих решений по устранению выявленных причин. Тем самым исключается возможность повторного возникновения проблемных ситуаций.

При сравнении влияния причин используются количественные оценки, которые обеспечивают выбор первоочередных целей управленческих решений, направленных на устранение наиболее весомых причин.

В табл. 1 в качестве примера приведены результаты анализа удельного веса причин задержек при перевозке птицы и при выполнении смежных с перевозкой технологических операций [8]. По данным анализа установлено, что наибольший удельный вес причин приходится на технологические операции

перевозки (рис. 1). Основную долю в этом случае составляют задержки при растентовке и организационно-технологические перерывы при разгрузке.

Авторами исследовано воздействие температуры внешней среды на перевозимую в автомобиле-птицевозе птицу и установлены зависимости, которые подтверждают негативное влияние задержек, возникающих при перевозке, на потери транспортируемого поголовья (рис. 2).

Управление продолжительностью перевозки на различных ее этапах осуществляется за счет оперативной корректировки персоналом птицеводческого комплекса режимов своей работы, что позволяет снизить задержки при погрузке, движении и разгрузке птицевоза и сократить время нахождения птицы в его кузове. Предлагаемая методика управления продолжительностью перевозки живой птицы автомобильным транспортом включает пять этапов:

формирование электронной суточной заявки на перевозку и ее согласование со структурными подразделениями птицеводческого комплекса;

автоматический расчет параметров процесса перевозки и анализ его ресурсного обеспечения;

Таблица 1

Результаты анализа удельного веса причин задержек при перевозке птицы и выполнении смежных с перевозкой технологических операций

Технологическая операция	Место в технологической цепи	Причины задержек в выполнении технологических операций	Удельный вес, %	Вид урона поголовью
Перемещение птицы на погрузку и ее подача на мобильный стол	Бройлерная площадка	Обрыв ленты пометоудаления	0,75	Травмы
		Износ ленты пометоудаления по ширине	0,91	Гибель, травмы
		Отказ механических элементов привода	3,61	Гибель
		Механические повреждения или износ полок клеток	1,25	
		Отказ электромеханических элементов привода	0,19	Гибель, травмы
		Ожидание оборотных транспортировочных ящиков	17,2	
Отлов и погрузка птицы в транспортировочные ящики, установка ящиков в контейнеры		Отказ элементов мобильного стола	0,26	Гибель
		Износ конструктивных элементов транспортировочных ящиков	1,19	Травмы
Погрузка контейнеров в птицевоз и его подготовка к движению	Перевозка	Неисправность погрузчика	5,09	Гибель
		Потеря эластичности тента, сбой в опускании крыши птицевоза	2,78	
		Задержки при выезде	0,32	
		Вариабельность дорожно-климатических условий	1,22	
		Поломка птицевоза в пути следования	4,13	
		Необходимость дозаправки топливом на маршруте	0,58	
		Дорожно-транспортные происшествия	Не наблюдалось	Гибель, травмы
Подготовка птицевоза к разгрузке и съем контейнеров		Неисправность погрузчика	4,07	Гибель
		Задержки при растентовке	17,91	
		Организационно-технологические перерывы при разгрузке	9,96	
Установка контейнеров с птицей, извлечение из них транспортировочных ящиков, подача ящиков в зону приемки	Зона приемки цеха убоя и переработки	Неисправность устройств подачи контейнеров	10,07	Гибель
		Неисправность конвейера	11,27	
		Организационно-технологические перерывы в работе бригады	7,24	
Итого			100	—

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены причины задержек при выполнении технологических операций перевозки.

определение требуемой загрузки транспортировочных ящиков с учетом исправного парка птицевозов;
онлайн-мониторинг задержек на различных этапах перевозки;
разработку оперативных мероприятий по сокращению задержек в процессе перевозки, по причине каких-либо сбоев в погрузке, при движении птицевоза с грузом и холостым ходом, при его разгрузке.

Предлагаемая методика формализована в виде алгоритма (рис. 3). Электронная заявка, формируемая на первом этапе, представляет собой документ, позволяющий менеджеру бройлерной площадки в режиме удаленного доступа указывать в корпоративной информационной системе (КИС) птицеводческого комплекса потребность в автотранспорте и других производственных ресурсах, необходимых для отгрузки поголовья. Электронная заявка формируется заблаговременно (как правило, до 14.00 предыдущей рабочей смены).

Уполномоченное лицо заполняет интерактивную форму, в которой указывает следующую исходную информацию: дату забоя; наименование бройлерной площадки и номер цеха; численность забиваемого поголовья птицы; сохранность поголовья; списочный состав исправных на день забоя погрузочных машин; явочную численность на день забоя бригады машинистов погрузчиков, специалистов по отлову и отгрузке птицы.

Указанная в электронной заявке информация сохраняется в базе данных КИС, после чего система автоматически направляет запросы в цех убоя и переработки о готовности технологических линий к приему поголовья на предстоящую дату и запросы в автотранспортную службу о численности исправных птицевозов на дату забоя и о явочной численности водителей.

В случае внеплановых ремонтов технологического оборудования на дату забоя менеджер цеха убоя и переработки фиксирует в системе мотивированный отказ выполнения электронной заявки и указывает примерное время восстановления работоспособности технологической линии. Процедура формирования суточной электронной заявки отражена в современных системах управления базами данных (СУБД) при наличии связующего программного обеспечения и отраслевых бизнес-приложений (ERP- и CRM-систем). Высокорейтинговыми СУБД в настоящее время является продукция IBM, Oracle, Microsoft, MongoDB, Hwaci, Apache, SAP и др.

При готовности цеха убоя и переработки к приему поголовья в рамках второго этапа предлагаемой методики программа автоматически рассчитывает параметры перевозки и параметры ее ресурсного обеспечения. По итогам расчетов программа анализирует фактическую обеспеченность участников процесса перевозки производственными ресурсами. В первую очередь расчетами определяется число оборотных рейсов $N_{об}$, требуемое для освоения заданного объема перевозок, равного численности забиваемого поголовья. Исходя из часовой производительности и скорости конвейерной подвески птицы определяется минимальный интервал подачи птицевозов под разгрузку $I_{мин}$ во избежание очереди. Далее рассчитываются продолжительность оборотного рейса птицевоза $t_{об}$, число его оборотов за рабочий день с учетом пересмены водителей, нулевой пробег $t_{нр}$, число птицевозов на маршруте $A_{спт}$, необходимое число оборотных комплектов тары $A_{тара}$.

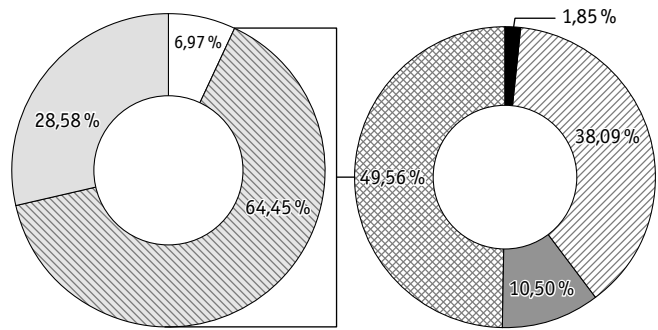


Рис. 1. Удельный вес причин потерь птицы от задержек при перевозке:

□ — бройлерная площадка; ▨ — перевозка; ▩ — зона подвески цеха убоя и переработки; ■ — механическое воздействие; ▤ — подверженность стрессу от нахождения в непривычных условиях; ▥ — температура окружающей среды; ▦ — плотность посадки в транспортировочные ящики

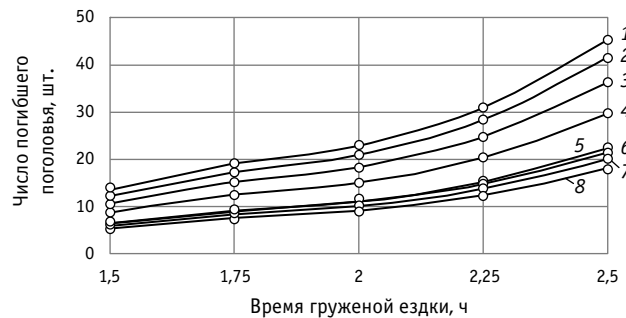


Рис. 2. Зависимость потерь птицы от времени груженой ездки автомобиля-птицевоза при температуре:

1 — от минус 35 до минус 30 °С; 2 — от минус 30 до минус 25 °С; 3 — от минус 25 до минус 20 °С; 4 — от минус 20 до минус 15 °С; 5 — от минус 15 до минус 10 °С; 6 — от минус 10 до минус 5 °С; 7 — от минус 5 до 0 °С; 8 — от 0 до плюс 5 °С

Справочной информацией при этом являются расстояние от цехов бройлерных площадок до цеха убоя и переработки, нулевые пробеги, график сменности водителей, грузоподъемность птицевоза, контейнеров и транспортировочных ящиков. Кроме того, расчеты должны строиться на анализе системой среднестатистических данных о технической скорости движения птицевозов по внутрирайонной автодорожной сети, простоях под погрузочно-разгрузочными операциями, продолжительности досмотра птицевозов на контрольно-пропускных пунктах, длительности санитарной обработки подвижного состава и тары. Массивы этой информации формируются из архивных файлов системы спутникового мониторинга автотранспорта птицеводческого комплекса.

На основании среднестатистических данных о продолжительности простоев птицевозов под погрузочно-разгрузочными операциями программа рассчитывает необходимое число погрузочно-разгрузочных машин $\Pi_{сп}$ и явочную численность операционного персонала $N_{яв}$ на участках отгрузки, разгрузки и подвески птицы. Результаты расчета сопоставляются с фактической обеспеченностью техническими и трудовыми ресурсами бройлерной площадки, цеха убоя и переработки и автотранспортной службы на предстоящий забойный день.

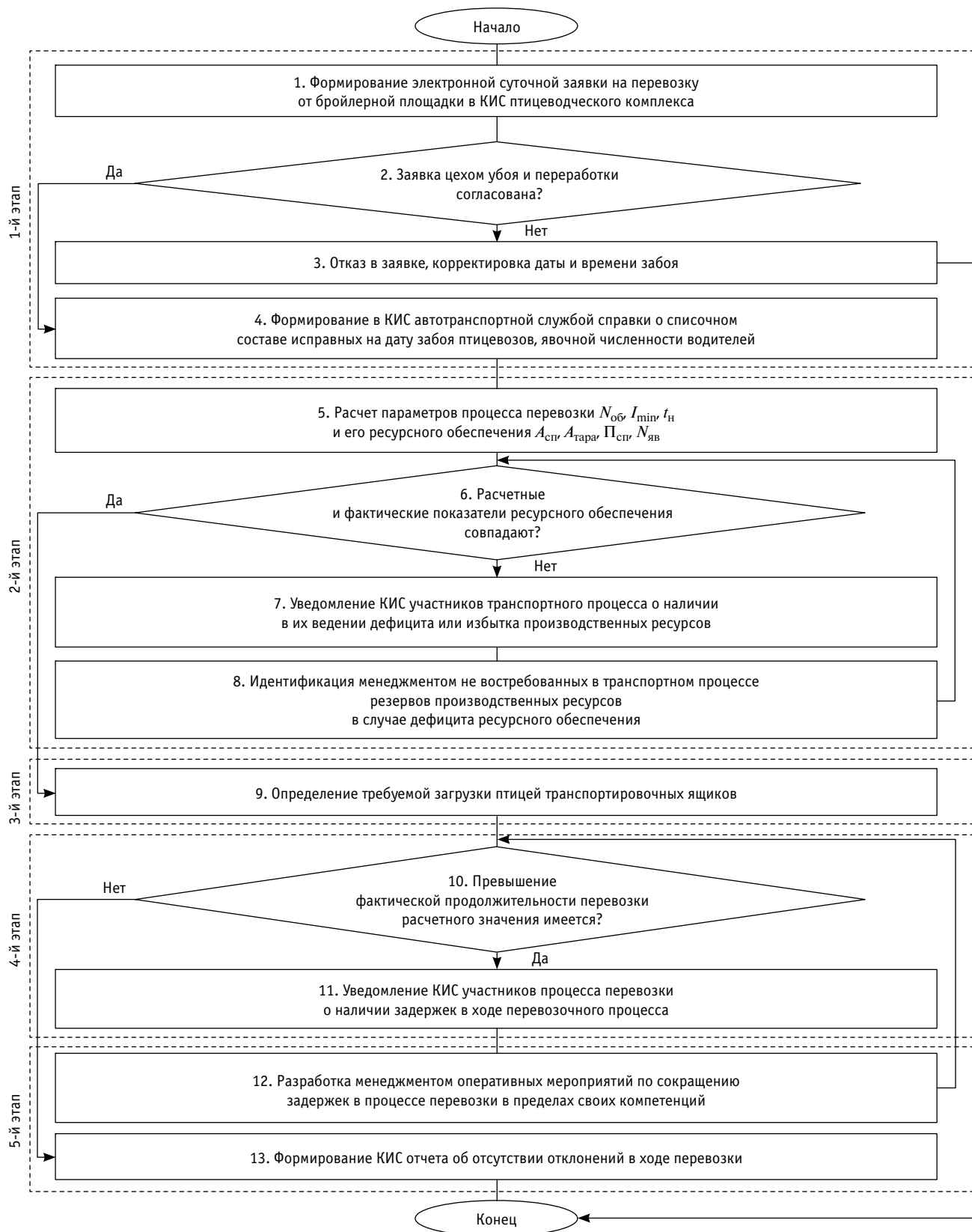


Рис. 3. Алгоритм управления продолжительностью перевозки живой птицы автомобильным транспортом



При наличии отклонений система автоматически уведомляет участников процесса перевозок об имеющемся дефиците производственных ресурсов или, наоборот, об их избытке. В случае дефицита ресурсного обеспечения менеджмент участка осуществляет идентификацию не востребованных в транспортном процессе резервов производственных ресурсов.

На третьем этапе определяется требуемая загрузка птицей транспортировочных ящиков. При этом контролируется соответствие массы брутто перевозимого груза и грузоподъемности транспортных контейнеров и автомобилей-птицевозов.

Четвертый этап предусматривает непрерывный онлайн-мониторинг задержек при выполнении технологических операций на различных этапах перевозки. Система в постоянном режиме фиксирует превышение фактической продолжительности перевозки над расчетными значениями, автоматически направляет уведомления пользователям о возникающих задержках при перевозке и о необходимости корректировок (в пределах компетенций пользователей).

На заключительном, пятом этапе менеджмент бройлерной площадки, цеха убоя и переработки, автотранспортной службы разрабатывает оперативные мероприятия по сокращению задержек при перевозке. Значительная вариативность случай-

ных факторов, затрудняющая прогноз времени и места возникновения сбоя в перевозочном процессе, а также большие потери поголовья по пути на забой делают важной скорость принятия решений по сокращению возникающих задержек. Высокая скорость принятия решений обеспечивается их типизацией и наличием стандартных алгоритмов действий персонала.

Вместе с тем типизация управленческих решений по устранению проблемных ситуаций требует учета специфики той производственной системы, для которой они предназначены. В табл. 2 приведен комплекс типовых мероприятий по сокращению задержек в процессе доставки птицы на забой.

Расчет экономического эффекта основан на разности суммарных экономических потерь от задержек в процессе перевозки до и после реализации предлагаемых рекомендаций с учетом снижения задержек при перевозке соответственно на 5, 10 и 15 % вследствие разработки менеджментом оперативных мероприятий в условиях одного из крупнейших агрохолдингов Уральского региона. Искомые потери включают стоимость погибшего при перевозке на забой поголовья, потери от переработки и реализации травмированной при перевозке птицы, убытки от холостой работы технологических линий цеха убоя и переработки. Результаты расчета представлены на рис. 4.

Таблица 2

Комплекс типовых мероприятий по сокращению задержек при перевозке птицы на забой

Лицо, принимающее решение	Технологическая операция	Мероприятие	Способы реализации	Ожидаемый эффект
Менеджер бройлерной площадки	Перемещение птицы на погрузку и ее подача на мобильный стол	Обеспечение исправности и запаса ресурса клеточного оборудования, устройств перемещения птицы и мобильного стола на момент начала погрузки	Проведение планово-предупредительных и сопутствующих профилактическим работам ремонтов технологического оборудования участка погрузки	Сокращение до нуля задержек погрузки по причине неисправности клеточного оборудования, устройств перемещения птицы и мобильного стола
	Перемещение птицы на погрузку и ее подача на мобильный стол, отлов и погрузка птицы в транспортировочные ящики	Перенос сроков погрузки на период с благоприятствующими погодными условиями	Начало погрузки при наступлении благоприятных погодных условий	Сокращение числа погибшего в процессе доставки на забой поголовья под влиянием неблагоприятных климатических условий (до 4 раз). Сокращение продолжительности погрузки
	Отлов и погрузка птицы в транспортировочные ящики	Концентрация высококвалифицированных специалистов по отлову и погрузке птицы на участке	По согласованию вызов специалистов с выходных и из отпусков, перевод с других бригад	Сокращение (не менее чем в 2 раза) продолжительности погрузки за счет наращивания производительности труда
Диспетчер автотранспортной службы по запросу менеджера бройлерной площадки и согласованию с менеджером цеха убоя и переработки	Перемещение птицы на погрузку и ее подача на мобильный стол, отлов и погрузка птицы в транспортировочные ящики	Увеличение численности персонала, занятого на отлове и погрузке птицы	Перевод специалистов с других участков бройлерной площадки для участия в отлове и погрузке птицы	Сокращение (до 1,5 раз) продолжительности погрузки за счет наращивания производительности труда
		Подача резервного птицевоза под погрузку для сокращения времени нахождения птицы на ленте пометоудаления в ожидании погрузки	Формирование комплекта путевой документации на резервный птицевоз и постановка задания водителю на смену	Сокращение (в 1,3–2 раза) времени нахождения птицы на ленте пометоудаления в ожидании погрузки

Окончание табл. 2

Лицо, принимающее решение	Технологическая операция	Мероприятие	Способы реализации	Ожидаемый эффект
Менеджер цеха убоя и переработки	Подготовка птицевоза к разгрузке, подготовка птицевоза к движению	Организация совместной работы машинистов погрузчиков и водителя птицевоза по тентованию (растентованию) птицевоза	Предварительное обучение машинистов погрузчиков дополнительным функциональным обязанностям с организацией оплаты за совмещение профессии. Проведение инструктажа перед началом смены	Сокращение продолжительности выполнения подготовительных операций к разгрузке и перед началом движения порожнего птицевоза. Сокращение времени нахождения птицы на ленте пометоудаления в ожидании погрузки
	Съем контейнеров с птицевоза	Обеспечение рациональной скорости конвейера на участке подвески	Изменение параметров скорости конвейера в программе, управляющей работой технологической линии убоя и переработки	Исключение образования очереди из птицевозов, ожидающих разгрузки. Сокращение потерь поголовья, находящегося в птицевозах и на ленте пометоудаления в ожидании погрузки
		Концентрация высококвалифицированных специалистов по подвеске птицы на участке	По согласованию вызов специалистов с выходных и из отпусков, перевод с других бригад	Сокращение продолжительности разгрузки за счет наращивания производительности труда
	Увеличение численности персонала, занятого на подвеске птицы	Переброска специалистов с других подразделений птицеводческого комплекса		
Съем контейнеров с птицевоза, загрузка чистыми контейнерами порожнего птицевоза	Рациональная комплектация вилочными погрузчиками заданных эксплуатационных характеристик участка приемки птицевозов	Проведение плано-предупредительных и сопутствующих профилактическим работам ремонтов погрузчиков. Переброска погрузчиков с других участков. По согласованию вызов с выходных и из отпусков машинистов погрузчика	Сокращение до нуля задержек в разгрузке птицевоза и в его загрузке чистыми контейнерами	
Менеджер цеха убоя и переработки по согласованию с менеджерами бройлерных площадок и с диспетчером автотранспортной службы	Загрузка чистыми контейнерами порожнего птицевоза	Обеспечение достаточного количества исправной оборотной тары в комплекте	Проведение плано-предупредительных и сопутствующих профилактическим работам ремонтов транспортных ящиков. Доставка невостребованной оборотной тары с других бройлерных площадок	Сокращение до нуля задержек в загрузке порожнего птицевоза чистой оборотной тарой. Сокращение потерь поголовья птицы от задержек в ожидании порожнего птицевоза

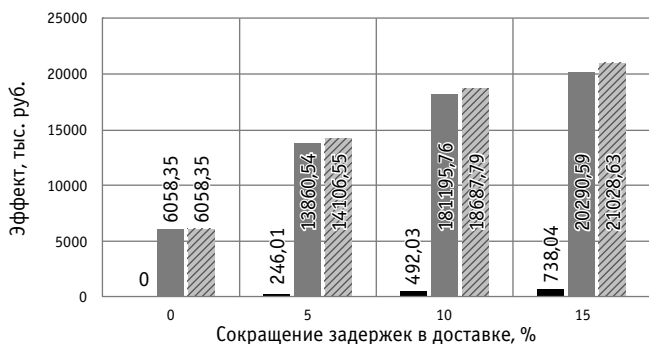


Рис. 4. Динамика годового экономического эффекта по источникам снижения потерь:
■ — холостая работа; ■ — потеря поголовья; ▨ — сумма

Использование предлагаемых рекомендаций в большей степени сокращает потери поголовья при перевозке на забой, чем убытки от холостой работы линий убоя и переработки. Кроме того, на сохранение бюджета птицеводческого комплекса большее влияние оказывают мероприятия, направленные на сравнительно незначительное сокращение задержек в процессе перевозки (до 5–10%), что не требует существенного ресурсного обеспечения, специальной подготовки и большого опыта работы менеджмента птицеводческого комплекса.

Литература

1. Грязнов М. В., Тимофеев Е. А. Оптимизация доставки живой птицы автотранспортом на птицеводческом комплексе // Транспортное обеспечение логистического комплекса в условиях Евразийского экономического союза : материалы Национальной научно-технической конференции. Москва : МАДИ, 2019. С. 155–156.
2. ГОСТ Р ИСО 10018–2014. Менеджмент качества. Руководящие указания по вовлечению работников и их компетентности. Москва : Стандартинформ, 2015. 24 с.
3. Курганов В. М. Управление автомобильными перевозками на основе ситуационного подхода : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2004. 334 с.
4. Рассоха В. И. Повышение эффективности эксплуатации автомобильного транспорта на основе разработанных научно-технических, технологических и управленческих решений : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Оренбург, 2010. 309 с.
5. Ефименко Д. Б. Методологические основы построения навигационных систем диспетчерского управления перевозочным процессом на автомобильном транспорте (на примере городского пассажирского транспорта) : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2012. 479 с.
6. Курганов В. М. Ситуационное управление автомобильными перевозками : монография. Москва : МАДИ, 2003. 196 с.
7. Курганов В. М. Логистика. Управление автомобильными перевозками. Москва : Книжный мир, 2007. 448 с.
8. Тимофеев Е. А., Грязнов М. В., Курганов В. М. Перевозка живой птицы автомобильным транспортом на современном птицеводческом комплексе : монография / Под ред. В. М. Курганова. Магнитогорск : Магнитогорский Дом печати, 2020. 120 с.

Объем статьи 0,77 авторских листа

References

1. Gryaznov M. V., Timofeev E. A. Optimization of delivery of live poultry by road at the poultry complex [Optimizatsiya dostavki zhivoy ptitsy avtotransportom na ptitsevodcheskom komplekse] // Transport support of the logistics complex in the conditions of the Eurasian Economic Union: materials of the National scientific and technical conference. Moscow : MADI, 2019. Pp. 155–156.
2. GOST R ISO 10018–2014. Quality management — Guidelines on people involvement and competence (IDT) [Menedzhment kachestva. Rukovodyashhie ukazaniya po вовлечениyu rabotnikov i ikh kompetentnosti]. Moscow : Standardinform, 2015. 24 p.
3. Kurganov V. M. Control of road transportation on the basis of situational approach [Upravlenie avtomobil'nymi perevozkami na osnove situatsionnogo podkhoda] : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2004. 334 p.
4. Rassokha V. I. Improving the efficiency of road transport operation based on the developed scientific, technical, technological and managerial solutions [Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii avtomobil'nogo transporta na osnove razrabotannykh nauchno-tekhnicheskikh, tekhnologicheskikh i upravlencheskikh resheniy] : DSc in Engineering Thesis. Orenburg, 2010. 309 p.
5. Efimenko D. B. Methodological foundations for the construction of navigation systems for dispatch control of the transportation process in road transport (on the example of urban passenger transport) [Metodologicheskie osnovy postroeniya navigatsionnykh sistem dispetcherskogo upravleniya perevoznym protsessom na avtomobil'nom transporte (na primere gorodskogo passazhirskego transporta)] : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2012. 479 p.
6. Kurganov V. M. Situational control of road transportation [Situatsionnoe upravlenie avtomobil'nymi perevozkami] : monograph. Moscow : MADI, 2003. 196 p.
7. Kurganov V. M. Logistics. Control of road transportation [Logistika. Upravlenie avtomobil'nymi perevozkami]. Moscow : Book World, 2007. 448 p.
8. Timofeev E. A., Gryaznov M. V., Kurganov V. M. Transportation of live poultry by road at a modern poultry complex [Perevozka zhivoy ptitsy avtomobil'nym transportom na sovremennom ptitsevodcheskom komplekse] : monograph / Ed. by V. M. Kurganov. Magnitogorsk : Press House of Magnitogorsk, 2020. 120 p.

УДК 656.135.2

Елена Дмитриевна Псеровская, кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,
 Анна Павловна Грефенштейн, аспирант кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА ПРИ РАЗНЫХ ВАРИАНТАХ КОНСОЛИДАЦИИ ГРУЗОПОТОКОВ

Elena Dmitrievna Pserovskaya, PhD in Engineering, Associate Professor, Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,
 Anna Pavlovna Grefenshteyn, postgraduate student, Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Assessment of efficiency of distribution centre at different variants of freight traffic consolidation

Аннотация

Для определения потенциальной выгоды от создания распределительного центра предложена методика и выполнен расчет снижения общего числа поездок и суммарного пробега автомобилей при разных вариантах консолидации грузов. Установлено положительное влияние такого центра на внутригородские перевозки. При этом высокая эффективность рассматриваемой технологии может достигаться за счет привлечения большого числа получателей и за счет консолидации относительно небольшого количества партий грузов в одном автомобиле при эффективной маршрутизации и правильном выборе места расположения.

Ключевые слова: городской распределительный центр, консолидация, маршрут, поставка, получатель.

Summary

For the determination of a potential benefit from creation of a distribution centre the paper proposes a method and presents results of calculation of a decrease of total number of rides and total run of automobiles at various variants of goods consolidation. The authors have established a positive influence of the centre on intracity transportation. At the same time, high efficiency of the considered technology can be reached by involvement of a bigger number of consignees and by consolidation of a relatively small number of goods batches in one automobile at efficient routing and correct selection of location of a distribution centre.

Keywords: city distribution centre, consolidation, route, delivery, consignee.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-22-27

В последние десятилетия во всем мире городская логистика становится предметом пристального внимания ученых, представителей органов власти, транспортников, членов общественных урбанистических организаций, горожан.

В научной сфере наблюдается взрывной рост публикаций в ведущих российских и международных журналах, посвященных изучению проблем функционирования подсистемы пассажирского транспорта и их влиянию на логистику крупных городов и агломераций. В то же время начиная с конца XX в. делаются попытки контролировать грузовую логистику в связи с негативным влиянием автомобильного движения на качество жизни людей.

Обзор методов по управлению грузопотоками, применяемых в нашей стране и за рубежом, выполнен в предыдущем исследовании авторов [1]. Данная статья сфокусирована на определении потенциальных выгод от терминальной технологии доставки по отношению к классическому варианту перевозки грузов в городах.

В литературных источниках городские терминалы получили разнообразные терминологические обозначения. В нашей статье для логистической платформы, куда могут прибывать грузы, перерабатываться и консолидироваться в рамках одной доставки (в одном транспортном средстве) для нескольких грузополучателей, будет использовано определение «городской распределительный центр» (ГРЦ).

Обзор зарубежных научных работ, посвященных внутригородским перевозкам, позволяет сделать вывод, что результативность ГРЦ нередко [2–5] анализируется по экономии суммарных логистических затрат, которая достигается в конкретных местных условиях при конкретных технологиях (схемах, способах, сценариях) доставки «последней мили».

Стоит отметить, что во многих российских городах нововведения в системе перевозок часто оказываются труднореализуемыми и, если они не принесут ожидаемого результата,

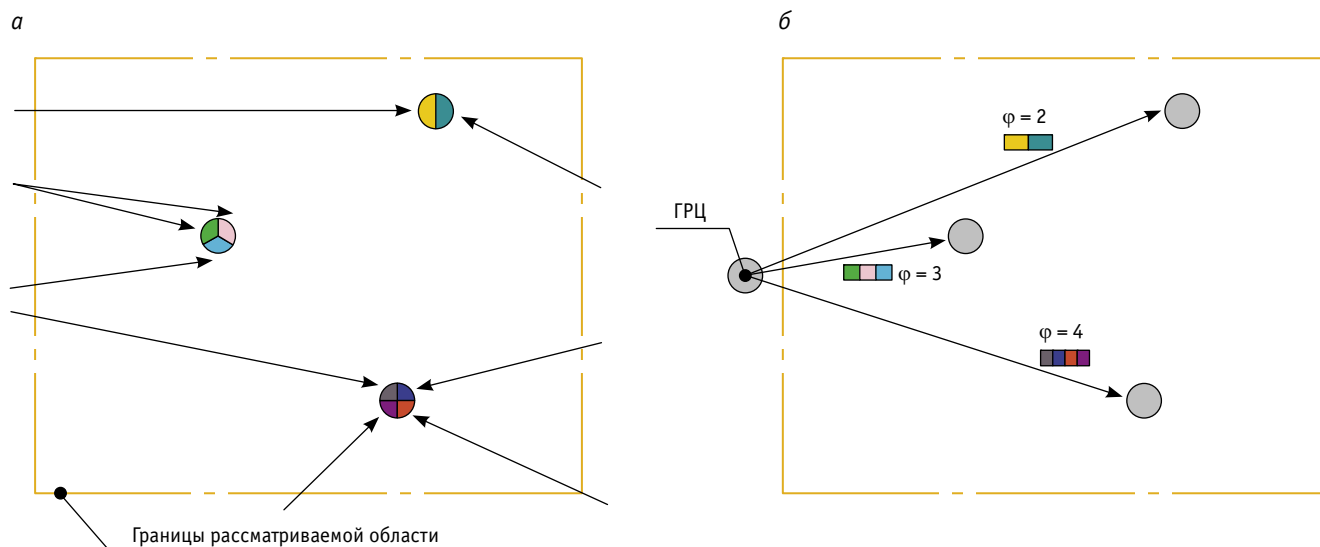


Рис. 1. Иллюстрация сценария с маятниковыми маршрутами до (а) и после введения (б) ГРЦ:
φ — количество партий грузов для разных получателей

впоследствии вызовут протест со стороны участников транспортного процесса [6]. Поэтому на стадии планирования транспортных проектов особенно важно с достаточной точностью оценивать потенциальные эффекты по методикам, иллюстрирующим наглядные закономерности (например, в виде графиков или таблиц). В связи с этим задача данного исследования определена как теоретическая оценка целесообразности введения ГРЦ при разных вариантах объединения грузов в общем грузопотоке.

Подход, предложенный в работе [7], заключается в оценке влияния ГРЦ на количество грузовых поездок в рассматриваемом районе города. В качестве критерия эффективности принято снижение общего количества доставок грузов при полном удовлетворении спроса грузополучателей. В статье термин «доставка» означает поездку грузового автомобиля, ограниченную только двумя точками — начальной (пунктом отправления) и конечной (пунктом назначения).

Показатель эффективности R определяется по формуле

$$R = \frac{\hat{T}_m}{T_m} \leq 1, R \rightarrow \min, \quad (1)$$

где \hat{T}_m и T_m — суммарное количество доставок после и до введения ГРЦ соответственно.

Если $R > 1$, то создание и использование ГРЦ увеличит количество доставок, а следовательно, скопление грузовиков в пунктах разгрузки, трафик на улично-дорожной сети рассматриваемого района, выбросы в окружающую среду и т.д. При $R < 1$ эффект окажется положительным.

Рассмотрим сценарий, характерный для территорий города с высокой долей торговой активности, где в одном пункте разгрузки (в одном здании, например в торговом центре) находится несколько потребителей (клиентов, магазинов, грузополучателей).

Во-первых, при таком сценарии считается, что если потребители принимают решение об использовании ГРЦ, то все предназначенные для них доставки будут направляться через ГРЦ.

Во-вторых, подразумевается, что при использовании ГРЦ потребное количество поставок в магазин не меняется в рамках одного дня. То есть выбранная технология перевозки грузов никак не влияет на периодичность поступления товаров, а определяется лишь требованиями потребителя (например, 1 или 3 раза в день и т.д.).

В-третьих, грузовые автомобили ГРЦ посещают только один пункт назначения за одну поездку. Таким образом, автомобили в ГРЦ загружаются грузами, предназначенными только для одного пункта назначения, за раз выгружаются и возвращаются в ГРЦ перед следующей доставкой.

В-четвертых, во всех пунктах назначения принимается одинаковый процент (доля, уровень) потребителей, которые будут использовать ГРЦ. То есть в рассматриваемом сценарии вероятность использования ГРЦ не зависит от атрибутов грузополучателей.

Схематично описанные условия изображены на рис. 1.

Количество доставок до введения ГРЦ. Каждому грузополучателю рассматриваемого района должны доставить d_s поставок товаров в течение дня, при этом D_s — совокупность поставок получателю s :

$$D_s = (1, 2, 3, \dots, i, \dots, d_s). \quad (2)$$

Удельный (эффективный) вклад получателя s в общее количество доставок в рассматриваемом районе может быть определен по выражению

$$t_s = \sum_{i \in D_s} \frac{1}{k_{i,s}}, \quad (3)$$

где $k_{i,s}$ — количество получателей в одном пункте назначения, поставки которым объединены с получателем s в рамках i -й поездки.

То есть $k_{i,s} = 1$, если в одном грузовом автомобиле перевозятся товары одного клиента, и $k_{i,s} > 1$, если получатели, находящиеся в одном здании, объединили партии грузов до введения ГРЦ путем координации своей деятельности (договорились).

Количество доставок всем получателям S рассматриваемого района определяется по формуле

$$T_m = \sum_{s \in S} \sum_{i \in D_s} \frac{1}{k_{i,s}} \quad (4)$$

Предположим, что рассматриваемые получатели товаров (магазины) одного типа с одинаковыми значениями $k_{i,s}$ и d_s , тогда формула (4) с учетом упрощений примет вид

$$T_m = S \cdot \frac{d_s}{k} \quad (5)$$

где k — среднее количество получателей в одном пункте назначения, поставки которым объединяются в рамках одной поездки.

Количество доставок после введения ГРЦ. Удельный (эффективный) вклад получателя s_1 , использующего ГРЦ, в общее количество поездок

$$\hat{t}_{s_1} = \frac{d_{s_1}}{\varphi} \quad (6)$$

где d_{s_1} — суточное количество поставок магазина s_1 (по условиям остается неизменным, т.е. $d_{s_1} = d_s$);

φ — уровень консолидации (level of consolidation).

Уровень (степень) консолидации — показатель, равный среднему количеству партий грузов разных получателей, объединенных ГРЦ в транспортном средстве в рамках одной поездки с одним пунктом разгрузки. Например, $\varphi = 2$, если один грузовик ГРЦ доставляет груз двух клиентов с выгрузкой в одном торговом здании.

Удельный вклад получателя s_0 , не использующего ГРЦ, в общее количество поездок

$$\hat{t}_{s_0} = \sum_{i \in D_s} \frac{1}{1 + (1 - \alpha)(k_{i,s} - 1)} \quad (7)$$

где α — уровень участия (level of participation).

Уровень (доля, процент) участия — это показатель, равный доле от общего количества всех получателей S , поставки которым будут осуществляться через ГРЦ. Например, $\alpha = 0,6$, если 60% получателей будут использовать ГРЦ, а 40% откажутся.

Тогда с учетом вышеизложенного количество доставок после введения ГРЦ можно найти как

$$\hat{T}_m = \alpha \cdot S \cdot \frac{d_s}{\varphi} + (1 - \alpha) \cdot S \cdot \frac{d_s}{1 + (1 - \alpha)(k - 1)} \quad (8)$$

После преобразования формулы (1) с учетом выражений (5) и (8) показатель эффективности равен

$$R = \frac{\hat{T}_m}{T_m} = \alpha \cdot \frac{k}{\varphi} + (1 - \alpha) \cdot \frac{k}{1 + (1 - \alpha)(k - 1)} \quad (9)$$

Пример. По разным данным [8, 9] в нашей стране в 75–80% случаев грузовой автомобиль автотранспортного предприятия выполняет в городе всего один рейс в день. При этом больше трети всех рейсов осуществляется по маятниковым маршрутам [9]. Поэтому при $k = 1$ график зависимости $R = (\alpha, \varphi)$ будет иметь вид, представленный на рис. 2. Проекция на плоскости построенной фигуры показаны на рис. 3.

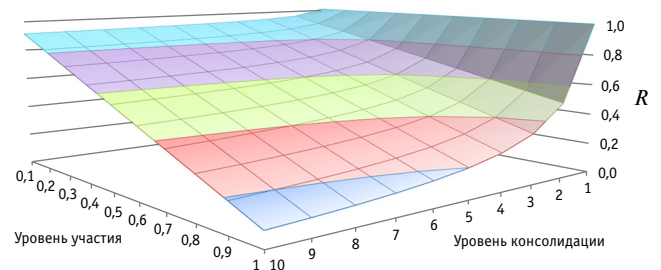


Рис. 2. Влияние ГРЦ на общее количество доставок

Полученные материалы иллюстрируют положительное воздействие ГРЦ (см. рис. 3) на систему внутригородских грузовых перевозок.

С ростом α (доли грузополучателей, которые будут использовать ГРЦ) наблюдается снижение количества грузовых поездок. При этом значение φ (количество объединенных партий) не оказывает существенного положительного влияния при низкой доле вовлеченных в новую технологию получателей. Например, при $\alpha = 10\%$ консолидация даже 6–10 партий грузов снизит общее количество поездок не более чем на 10%. С дальнейшим ростом α возрастает и степень влияния φ на общий результат. Так, при $\alpha = 70\%$ консолидация всего двух партий грузов снизит общее количество поездок на 35%. Однако при высоких значениях уровня консолидации φ наблюдается убывающая выгода от технологии. Например, при любом α увеличение φ от 6 до 10 даст эффект не выше 10%.

Графики доказывают, что высокая эффективность перевозок с ГРЦ может достигаться за счет привлечения большего числа грузополучателей и за счет консолидации относительно небольшого числа партий грузов в одном автомобиле. Это позволит использовать небольшие грузовые автомобили для внутригородских перевозок. Например, при $\varphi = 2$ количество доставок в рассматриваемом районе может быть снижено на 40%, если 80% магазинов заключат договор с ГРЦ.

Предложенная методика отличается высокой информативностью при достаточной простоте, позволяет использовать графические материалы для определения эффективности ГРЦ, не требует трудоемкого сбора и анализа большого объема данных, универсальна для разных городов за счет способности адаптации под частные случаи и т.д.

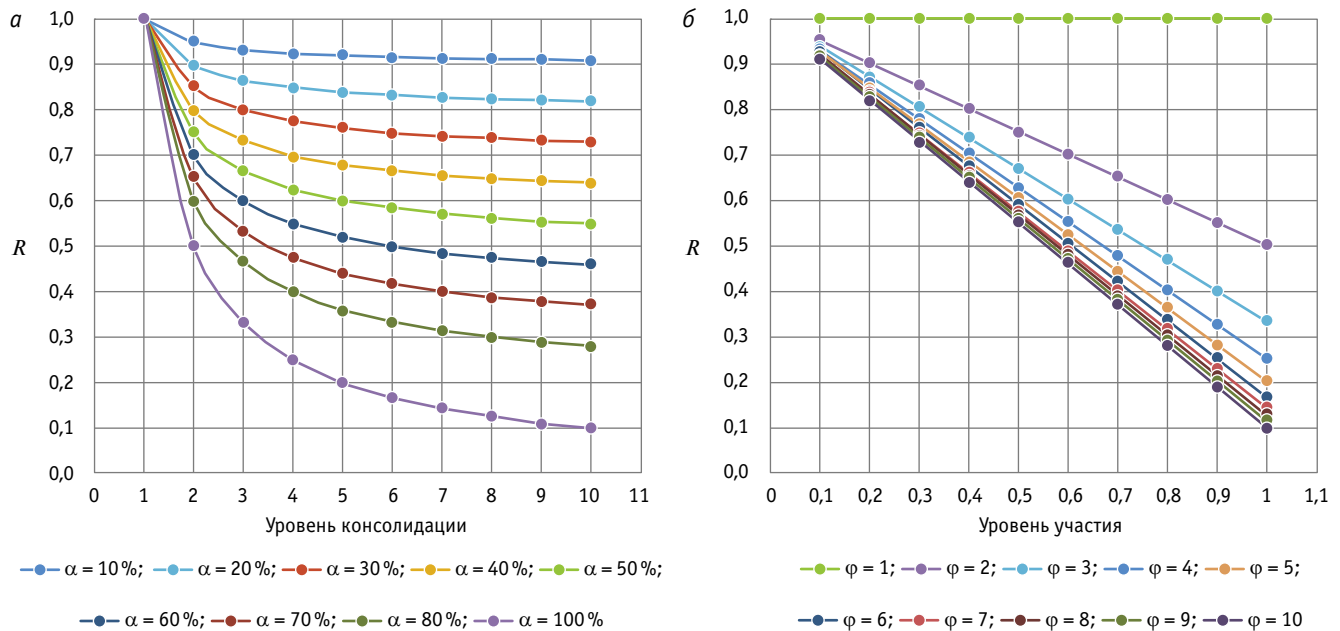


Рис. 3. Влияние α и ϕ на общее количество доставок:
а — при увеличении ϕ ; б — при увеличении α

Однако считаем, что для более точной оценки эффективности ГРЦ в ряде случаев необходимо рассматривать не снижение общего количества доставок в рассматриваемом районе, а изменение такого показателя, который более корректно описывает результативность центра распределения в аспекте поставленной задачи исследования. Критерием оптимизации может быть время работы на маршруте, время передвижения, расстояние перевозок и др. [10].

В качестве примера оценим изменение суммарного пробега грузовых автомобилей R' при создании ГРЦ [аналогично формуле (1)]. Тогда предлагаемая технология вызовет улучшения при $R' < 1$.

В России 70–80% объема грузов перевозится транспортными отделами торговых и промышленных корпораций [11]. Производственно-торговые сети используют технологию консолидации собственных товаров по коммерческому признаку, а не по территориальному, т.е. внутри компании без ГРЦ. Поэтому в городах более половины всех рейсов осуществляется по кольцевым сборочным или развозочным маршрутам [9].

Другими словами, транспортные отделы коммерческих сетей могут объединять $h_{i,s}$ партий грузов собственных торговых точек в одном транспортном средстве в рамках i -го кольцевого маршрута. В приведенном примере термин «маршрут» означает поездку с несколькими пунктами назначения (от 2 и более).

Предположим, что консолидация грузов может дать лучший эффект при объединении ϕ партий грузов разных торговых сетей вместо объединения товаров h получателей одной торговой сети. В этом случае снижение суммарного пробега возможно за счет наиболее выгодного расположения разных магазинов-грузополучателей по сравнению с точками одной торговой сети, удаленными друг от друга на большие расстояния. На рис. 4 схематично изображен описанный сценарий.

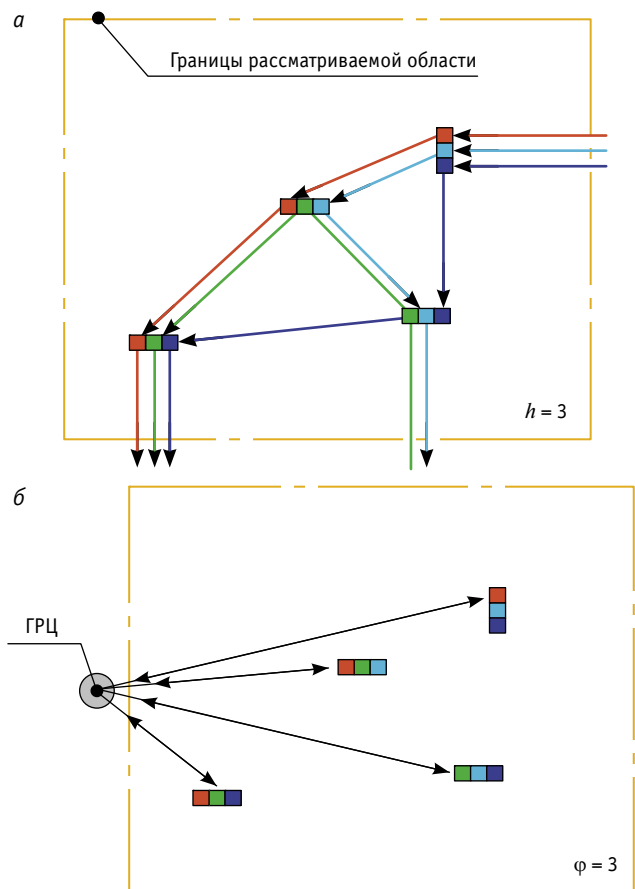


Рис. 4. Иллюстрация сценария с кольцевыми маршрутами до (а) и после введения (б) ГРЦ

Удельный (эффективный) вклад получателя s в общее количество маршрутов может быть определен как

$$t_s = \sum_{i \in D_s} \frac{1}{h_{i,s}}, \quad (10)$$

где $h_{i,s}$ — количество точек одной торговой сети, поставки в которые объединены с магазином-получателем s этой же торговой сети в рамках i -го маршрута.

То есть $h_{i,s} = 1$, если в одном грузовом автомобиле перевозят товары одного получателя, и $h_{i,s} > 1$ для нескольких точек доставки одной торговой сети.

Общее количество маршрутов в рассматриваемом районе

$$T_s = \sum_{s \in S} \sum_{i \in D_s} \frac{1}{h_{i,s}}. \quad (11)$$

Общая протяженность T_s маршрутов

$$C_m = \sum_{s \in S} \sum_{i \in D_s} \frac{L_{i,s}}{h_{i,s}}, \quad (12)$$

где $L_{i,s}$ — протяженность i -го кольцевого маршрута, который магазин s делит с $h_{i,s}$ другими магазинами одной торговой сети.

Введя допущения, аналогичные к формуле (5), после преобразований формулы (12) получим выражение

$$C_m = S \cdot \frac{d_s}{h} \cdot L, \quad (13)$$

где h — среднее количество получателей товаров одной торговой сети, поставки которым объединяются одним маршрутом; L — средняя протяженность маршрута в рассматриваемом районе.

Общая протяженность маршрутов после введения ГРЦ находится аналогично формуле (8)

$$\hat{C}_m = \alpha \cdot S \cdot \frac{d_s}{\varphi} \cdot \hat{L}_\alpha + (1 - \alpha) \cdot S \cdot \frac{d_s}{h} \cdot \hat{L}_{1-\alpha}, \quad (14)$$

где \hat{L}_α — средняя протяженность маятникового маршрута от ГРЦ до получателей, использующих ГРЦ;

$\hat{L}_{1-\alpha}$ — средняя протяженность кольцевого маршрута в рассматриваемом районе.

После преобразования формулы (1) с учетом выражений (13) и (14) показатель эффективности находится как

$$R' = \frac{\hat{C}_m}{C_m} = \alpha \cdot \frac{h}{\varphi} \cdot \frac{\hat{L}_\alpha}{L} + (1 - \alpha) \cdot \frac{\hat{L}_{1-\alpha}}{L}. \quad (15)$$

Таким образом, результативность технологии зависит не только от изменения общего числа доставок в каждое торговое здание, но и от вариации суммарной протяженности всех поездок для развоза грузов. Важно отметить, что среднее расстояние перевозок — параметр, который в реальной ситуации зависит от ряда обстоятельств: месторасположения грузополучателей, размещения ГРЦ, правильности маршрутизации, выбора подвижного состава, настоящей ситуации на дорогах и т.д. Тогда $\frac{\hat{L}_\alpha}{L}$ и $\frac{\hat{L}_{1-\alpha}}{L}$ в разных случаях могут варьироваться.

Пусть средняя протяженность маршрутов при обслуживании торговых точек, не использующих ГРЦ, не превысит аналогичный показатель до введения терминальной технологии, т.е.

$$\frac{\hat{L}_{1-\alpha}}{L} \leq 1.$$

Определим допустимые диапазоны изменения средних пробегов, при которых $R' < 1$.

Пример. Рассмотрим два сценария — оптимистичный и пессимистичный (табл. 1). Пусть до введения ГРЦ грузовики в среднем за маршрут обслуживают $h = 3$ пункта выгрузки.

Таблица 1

Параметры возможных сценариев

Сценарий	Уровень участия	Уровень консолидации
Оптимистичный	$\alpha = 0,7$	$\varphi = 4$
Пессимистичный	$\alpha = 0,3$	$\varphi = 3$

Полученные с помощью выражения (15) значения R' показаны на рис. 5 и 6.

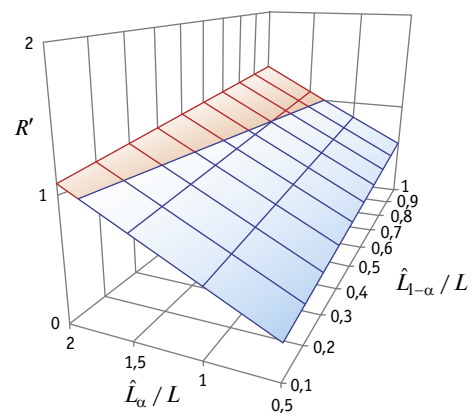


Рис. 5. Оптимистичный вариант

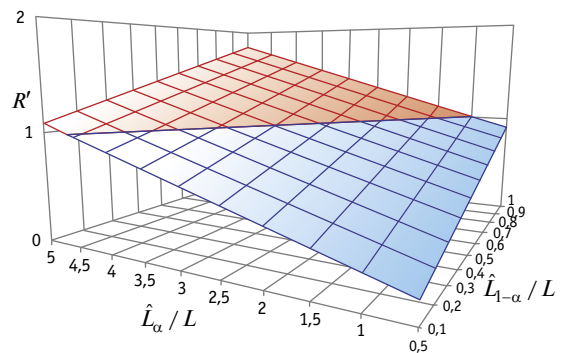


Рис. 6. Пессимистичный вариант

Сравнение рис. 5 и 6 доказывает, что при увеличении α особо важным становится качество маршрутизации автомобилей ГРЦ и расположение ГРЦ. Так как если после введения ГРЦ соотношение средних пробегов до и после $\frac{\hat{L}_\alpha}{L}$ вырастет в 1,5–2 раза, то улучшений не будет (см. рис. 5).

При высоком значении α изменение среднего пробега автомобилей торговых сетей $\frac{\hat{L}_{1-\alpha}}{L}$ не оказывает существенного влияния на суммарный критерий эффективности. Однако

при низком α внешние эффекты от грузоперевозок будут зависеть только от торгово-производственных компаний (см. рис. 6), не замотивированных в улучшении городской жизни.

Определение сокращения пробега грузовых автомобилей позволит рассчитывать эффективность предлагаемой технологии в разных сценариях и частных случаях, а также получать выводы о целесообразности создания ГРЦ. Кроме того, предлагаемую методику можно использовать для расчетов внешних положительных эффектов (например, экологических), что будет полезно представителям органов власти и администраций городов.

Литература

1. Псеровская Е. Д., Грешенштейн А. П. Актуальность формирования системы распределения грузопотоков в крупных городах // Техника и технология транспорта. 2020. № 4 (19). 7 с. ISSN 2541–8157.
2. Urban consolidation solutions for parcel delivery considering location, fleet and route choice / M. D. Simonia, P. Bujanovica, S. D. Boylesa, E. Kutanoglub // Case Studies on Transport Policy. 2018. No. 6. Pp. 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.11.002>.
3. Isaa S. S., Lima O. F., Fioravantib R. D. The Kaldor-Hicks Criterion Applied to Economic Evaluation of Urban Consolidation Centers // Transportation Research Procedia. 2020. No. 48. Pp. 416–427. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.049>.
4. Akkad M. Z., Bányai T. Multi-Objective Approach for Optimization of City Logistics Considering Energy Efficiency // Sustainability. 2020. No. 12 (18). Pp. 1–23. <https://doi.org/10.3390/su12187366>.
5. Roca-Riu M., Estradaa M., Fernández E. An evaluation of urban consolidation centers through continuous analysis with non-equal market share companies // Transportation Research Procedia. 2016. No. 12. Pp. 370–382. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.073>.
6. Павлов С. Н., Грешенштейн А. П. Совершенствование методики оценки целесообразности введения выделенной полосы в крупных городах // Вестник СГУПС. 2020. № 4 (55). С. 19–26. ISSN 1815–9265.
7. Mepparambath R. M., Cheah L., Courcoubetis C. A theoretical framework to evaluate the traffic impact of urban freight consolidation centres // Transportation Research Part E. 2021. No. 145. Pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102134>.
8. Маркелова Т. В. Совершенствование планирования перевозок грузов автомобильным транспортом общего пользования : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск, 2018. 164 с.
9. Логистика автомобильного транспорта : учебное пособие / В. С. Лукинский, В. И. Бережной, Е. В. Бережная [и др.]. Москва : Финансы и статистика, 2004. 368 с.
10. Трофимова Л. С. Методология текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия с учетом взаимосвязи коммерческой и технической эксплуатации : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Омск, 2018. 320 с.
11. Батищев И. И. Рынок автомобильных грузоперевозок в России: основные проблемы и предложения // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 1 (74). С. 30–34. ISSN 1994–831X.

References

1. Pserovskaya E. D., Grefenshteyn A. P. Relevance of the freight distribution system in major cities [Aktual'nost' formirovaniya sistemy raspredeleniya gruzopotokov v krupnykh gorodakh] // Technique and technology of transport. 2020. No. 4 (19). 7 p. ISSN 2541–8157.
2. Urban consolidation solutions for parcel delivery considering location, fleet and route choice / M. D. Simonia, P. Bujanovica, S. D. Boylesa, E. Kutanoglub // Case Studies on Transport Policy. 2018. No. 6. Pp. 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.11.002>.
3. Isaa S. S., Lima O. F., Fioravantib R. D. The Kaldor-Hicks Criterion Applied to Economic Evaluation of Urban Consolidation Centers // Transportation Research Procedia. 2020. No. 48. Pp. 416–427. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.049>.
4. Akkad M. Z., Bányai T. Multi-Objective Approach for Optimization of City Logistics Considering Energy Efficiency // Sustainability. 2020. No. 12 (18). Pp. 1–23. <https://doi.org/10.3390/su12187366>.
5. Roca-Riu M., Estradaa M., Fernández E. An evaluation of urban consolidation centers through continuous analysis with non-equal market share companies // Transportation Research Procedia. 2016. No. 12. Pp. 370–382. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.073>.
6. Pavlov S. N., Grefenshteyn A. P. Improvement of technique for assessing dedicated bus lane efficiency in large cities [Sovershenstvovanie metodiki otsenki tselesoobraznosti vvedeniya vydelennoy polosy v krupnykh gorodakh] // The Siberian Transport University Bulletin. 2020. No. 4 (55). Pp. 19–26. ISSN 1815–9265.
7. Mepparambath R. M., Cheah L., Courcoubetis C. A theoretical framework to evaluate the traffic impact of urban freight consolidation centres // Transportation Research Part E. 2021. No. 145. Pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102134>.
8. Markelova T. V. Improvement of planning of goods of goods hauling by road transport of public traffic [Sovershenstvovanie planirovaniya perevozok gruzov avtomobil'nym transportom obshhego pol'zovaniya] : PhD in Engineering Thesis. Omsk, 2018. 164 p.
9. Logistics of road transport [Logistika avtomobil'nogo transporta] : textbook / V. S. Lukinskiy, V. I. Berezhnoy, E. V. Berezhnaya [et al.]. Moscow : Finance and Statistics, 2004. 368 p.
10. Trofimova L. S. Methodology of current planning of operation for freight road transport enterprise with the consideration for the interaction of commercial and technical exploitation [Metodologiya tekushhego planirovaniya raboty gruzovogo avtotransportnogo predpriyatiya s uchetoм vzaimosvyazi kommercheskoy i tekhnicheskoy ekspluatatsii] : DSc in Engineering Thesis. Omsk, 2018. 320 p.
11. Batishchev I. I. Motor freight transportation market in Russia: main problems and suggestions [Rynok avtomobil'nykh gruzoperevozok v Rossii: osnovnye problemy i predlozheniya] // Transport of the Russian Federation. 2018. No. 1 (74). Pp. 30–34. ISSN 1994–831X.

УДК 656.211.4

Алексей Валентинович Колин, старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Алексей Алексеевич Бакин, ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТУПИКОВЫХ ПАССАЖИРСКИХ СТАНЦИЙ

Alexey Valentinovich Kolin, Senior Lecturer, Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Alexey Alexeevich Bakin, Assistant Lecturer, Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Approaches to increase capacity of dead-end passenger stations

Аннотация

Рассмотрены технологические недостатки тупиковых пассажирских станций, сокращающие в целом пропускную способность железнодорожного участка и ограничивающие возможность снижения минимального межпоездного интервала. Установлено, что основной лимитирующий элемент тупиковой станции — длина стрелочной горловины. Представлена методика расчета минимально допустимого межпоездного интервала для линий с тупиковыми пассажирскими станциями, определяемого через станционные интервалы прибытия и отправления.

Проанализирован международный опыт снятия ограничений пропускной способности, предложены мероприятия и схемные решения, позволяющие в разной степени повысить пропускную способность стрелочных горловин тупиковых пассажирских станций (строительство путепроводной развязки в разных уровнях, использование шлюзового пути, радикальное сокращение длины стрелочной горловины с применением скоростных стрелочных переводов, увеличение скорости движения).

Ключевые слова: тупиковая пассажирская станция, повышение пропускной способности, стрелочная горловина, межпоездный интервал, путепроводная развязка, шлюзовой путь, пригородные перевозки.

Summary

The paper discusses technological drawbacks of dead-end passenger stations that decrease the capacity of a railway section in whole and constrain the possibility to decrease a minimal train-to-train interval. It is established that the main bottleneck of the dead-end station is the length of a yard neck. The authors present a method for calculation of a minimal acceptable train-to-train interval for lines with dead-end passenger stations that is determined by station intervals of departure and arrival.

The authors have analysed the international experience of elimination of capacity constraints and suggested measures and scheme solutions that allow increasing in various level the capacity of yard necks of dead-end passenger stations (construction of overbridge crossings, use of lock tracks, radical reduction of yard neck length with the use of high-speed switches, increase of speed).

Keywords: dead-end passenger station, increase of capacity, yard neck, train-to-train interval, overbridge crossing, lock track, commuter traffic.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-28-32

ВВЕДЕНИЕ

В России тупиковые пассажирские станции сконцентрированы прежде всего в Московском и Санкт-Петербургском железнодорожных узлах (шесть и четыре соответственно), а также во Владивостоке, Мичуринске, Нальчике, Анапе, Кисловодске и др. Они удобны для пассажиров, поскольку расположены в центре городов и хорошо связаны с общественным транспортом.

Вместе с тем для станций тупикового типа характерны следующие недостатки:

- необходимость смены направления следования транзитных пассажирских поездов и выполнения связанных с этим дополнительных маневров (маневровые операции по подаче и уборке локомотивов);

- высокая загрузка стрелочной горловины, в которой происходят все операции по приему, отправлению, маневровым передвижениям;

- значительное количество враждебных пересечений (не менее половины всех встречных перемещений в стрелочной горловине враждебны по отношению друг к другу и не могут выполняться одновременно);

- враждебные пересечения, ограничивающие пропускную способность станции, что, в свою очередь, приводит к ограничениям пропускной способности линии в целом;

- ограничение скорости движения поездов при приеме на перронные пути до 15–20 км/ч в начале пути приема, связанное с необходимостью выполнения требований безопасности и дополнительно снижающее пропускную способность.

Вместе с тем, несмотря на все перечисленные недостатки, в перспективных проектах планировки городов и планах переустройства транспортных узлов реконструкция большинства тупиковых пассажирских станций не предусмотрена [1, 2].

В соответствии с нормативными документами проектирования тупиковых пассажирских станций допускается только тогда, когда нет возможности соорудить станцию по сквозной схеме. Однако планируемое строительство специализированных высокоскоростных магистралей в Москве, Санкт-Петербурге

и других городах создает предпосылки для сооружения новых либо развития действующих тупиковых пассажирских станций.

Зарождающийся тренд интенсификации движения пригородных и пригородно-городских поездов и развития сервиса дневных межрегиональных перевозок в крупных транспортных узлах предусматривает значительный рост размеров движения на головных участках радиальных направлений, который не должен быть ограничен существующей пропускной способностью тупиковых станций [3].

АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТУПИКОВЫХ ПАССАЖИРСКИХ СТАНЦИЙ

Как известно, пропускная способность участков обратно пропорциональна стабильно обеспечиваемой величине межпоездного интервала [4]. На пассажирских станциях тупикового типа пропускную способность лимитируют стрелочные горловины, а на участках с интенсивным движением поездов, ограниченных такими станциями (особенно в Московском и Санкт-Петербургском узлах), именно пропускная способность стрелочных горловин определяет пропускную способность всего участка. Это наиболее заметно на таких участках пригородного движения, как Москва — Мытищи, Москва — Железнодорожная, Санкт-Петербург — Павловск и др.

Минимально допустимый межпоездной интервал I между последовательно прибывающими поездами, внутри которого происходит отправление поезда по маршруту, враждебному прибывающим поездам, рассчитывается по формуле

$$I = t_{\text{отпр}} + t_{\text{приб}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{отпр}}$ и $t_{\text{приб}}$ — соответственно продолжительность занятия стрелочной горловины, связанная с отправлением и приемом поезда, мин.

Продолжительность занятия горловины, связанная с приемом поезда, определяется как

$$t_{\text{приб}} = t_{\text{м}} + t_{\text{воспр}} + \frac{l_{\text{б-у}}}{0,5 \cdot 16,7(v_{\text{уст}} + v_{\text{горл.приб}})} + \frac{l_{\text{горл}}}{16,7 \cdot v_{\text{горл.приб}}} + \frac{l_{\text{п}}}{16,7 \cdot v_{\text{приб.по}}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{м}}$ — продолжительность построения маршрута приема, мин;
 $t_{\text{воспр}}$ — продолжительность восприятия разрешающего показания сигнала во время движения поезда (составляет 0,1 мин, при использовании системы автоведения поезда может быть уменьшена);

$l_{\text{б-у}}$ — длина предвходного блок-участка, м (при использовании бессветофорных средств интервального регулирования может быть принята равной величине тормозного пути с установленной скоростью движения);

16,7 — коэффициент перевода км/ч в м/мин;

$v_{\text{уст}}$ — установленная скорость движения на перегоне, км/ч;

$v_{\text{горл.приб}}$ — средняя скорость движения по стрелочной горловине по прибытию (ограничивается параметрами стрелочных переводов), км/ч;

$l_{\text{горл}}$ — длина стрелочной горловины, м;

$l_{\text{п}}$ — длина поезда, м;

$v_{\text{приб.по}}$ — средняя скорость движения поезда с момента вступления на приемоотправочный путь до момента освобождения стрелочной горловины с учетом ограничений скорости при прибытии поезда на тупиковый путь, км/ч.

Продолжительность занятия горловины, связанная с отправлением поезда, вычисляется по формуле

$$t_{\text{отпр}} = \frac{t_{\text{м}} + t_{\text{воспр.отпр}} + (l_{\text{по}} + l_{\text{горл}})}{16,7 \cdot v_{\text{отпр.сп}}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{воспр.отпр}}$ — продолжительность восприятия локомотивной бригадой разрешающего показания сигнализации перед отправлением (может также включать в себя продолжительность переговоров «минута готовности»), составляет 0,1–1,1 мин;

$l_{\text{по}}$ — полезная длина приемоотправочного пути, м;

$v_{\text{отпр.сп}}$ — средняя скорость движения поезда с момента отправления до момента освобождения стрелочной горловины, мин.

При использовании систем автоматического задания маршрутов и автоведения поезда значения $t_{\text{м}}$ и $t_{\text{воспр.отпр}}$ могут быть значительно уменьшены.

Из формул (2) и (3) видно, что основные элементы, влияющие на пропускную способность, — длина стрелочных горловин и скорость движения по ним.

На рис. 1а показан пример стрелочной горловины с перекрестными стрелочными переводами и съездами, стрелочными улицами с двумя параллельными ходами, какие обычно используются на тупиковых пассажирских станциях. Особенности таких стрелочных горловин — низкие скорости передвижения из-за перекрестных стрелочных переводов.

Длины существующих стрелочных горловин на тупиковых пассажирских станциях Москвы и Санкт-Петербурга составляют 400–850 м, и из-за ограничений скорости движения по стрелочным переводам значению межпоездного интервала между последовательно прибывающими поездами, внутри которого необходимо отправить поезд по враждебному прибывающим поездам маршруту, составляет 5–8 мин [5, 6]. Расчетные значения минимально допустимого межпоездного интервала между последовательно прибывающими поездами приведены в табл. 1.

Этот интервал значительно выше того, который могут обеспечить современные средства интервального регулирования на перегонах, станциях и остановочных пунктах. Так, на Московском центральном кольце (МЦК) межпоездной интервал составляет 4 мин (планируется снижение до 3 мин). В зарубежных системах массовых пригородно-городских перевозок (RER в Париже, CrossRail в Лондоне, S-Bahn в Мюнхене) обеспечиваются межпоездные интервалы 2,5 мин.

Наиболее эффективный способ снятия ограничений пропускной способности, возникающих в стрелочных горловинах тупиковых станций, — полный отказ от использования этих станций для оборота конечных пригородных и пригородно-городских поездов в центрах крупнейших мегаполисов. Например, в Парижском, Мюнхенском, Мадридском,

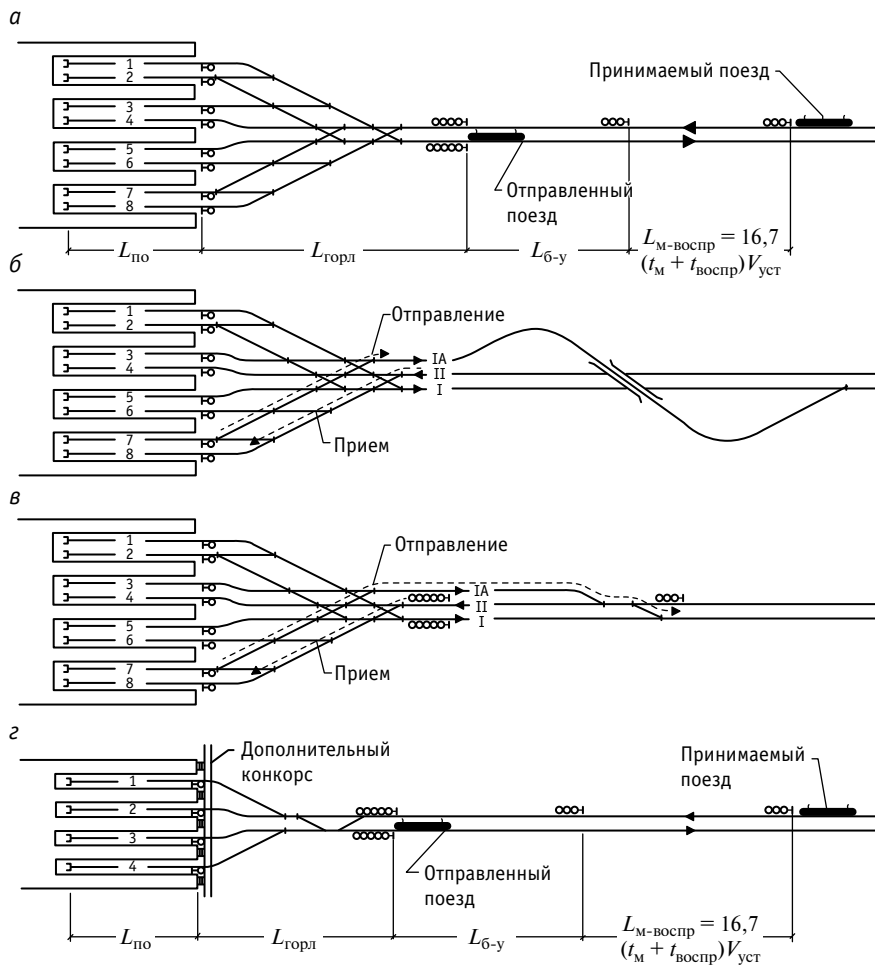


Рис. 1. Схемы расчета межпоездного интервала и способы повышения пропускной способности горловин тупиковых станций:

а — схема стандартной стрелочной горловины; б — схема стрелочной горловины с применением путепроводной развязки; в — схема стрелочной горловины с использованием шлюзового пути; 2 — схема стрелочной горловины сокращенной длины с применением стрелочных переводов пологих марок

Таблица 1

Минимальный межпоездной интервал по направлениям Московского железнодорожного узла

Радиальное направление Московского железнодорожного узла	Длина стрелочной горловины головной тупиковой станции, м	Расчетный минимально допустимый межпоездной интервал между последовательно прибывающими поездами по ограничению стрелочных горловин, мин
Ярославское	850	6
Ленинградское	450	7*
Казанское	650	5
Киевское	500	5
Павелецкое	550	5
Горьковское	400	6*

*Скорости движения пригородных поездов при прибытии на Ленинградский и Курский вокзалы ниже, чем на других направлениях.

Лондонском железнодорожных узлах в 1960–2010-е гг. были проведены работы по соединению тупиковых железнодорожных линий и организации маятникового движения пригородно-городских электропоездов при помощи создания дополнительных подземных участков, проходящих через центр города. В Берлинском железнодорожном узле сооружение новых соединительных линий позволило организовать пропуск пассажирских поездов всех категорий через одну новую узловую станцию сквозного типа, обладающую благодаря своей поточности огромной пропускной способностью (более 1100 поездов в сутки). В Московском железнодорожном узле в рамках реализации проекта «Московские центральные диаметры» (МЦД) главные пути пригородно-городского сообщения Горьковского, Киевского, Ленинградского и Казанского направлений в ближайшее время перестанут быть тупиковыми, что позволит ликвидировать ограничения пропускной способности, связанные со стрелочными горловинами тупиковых пассажирских станций.

ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТУПИКОВЫХ ПАССАЖИРСКИХ СТАНЦИЙ

Следует отметить, что по местным, градостроительным и экономическим условиям полный отказ от использования пассажирских станций тупикового типа для оборота конечных поездов возможен не всегда. Так, Ярославское и Павелецкое направления Московского железнодорожного узла, направления Санкт-Петербургского железнодорожного узла в ближайшей перспективе будут начинаться и заканчиваться на станциях тупикового типа [7]. В таких случаях необходимо применять иные способы повышения пропускной способности, например: сооружение путепроводной развязки, позволяющей ликвидировать враждебность между прибывающими и отправляемыми поездами; строительство шлюзового пути, увеличивающего маневренность тупиковой станции; уменьшение длины стрелочной горловины за счет сокращения времени оборота составов пригородных поездов

и, следовательно, снижения потребного количества приемоотправочных путей;

увеличение скоростей движения по стрелочной горловине в результате ликвидации перекрестных стрелочных переводов и укладки стрелочных переводов пологих марок.

На рис. 1б показано, как использование путепроводной развязки в разных уровнях позволяет полностью ликвидировать враждебность между прибывающими и отправляемыми поездами. В зависимости от того, на какой путь производится прием поезда, для отправления другого поезда выбирается путь I или Ia (с последующим его проследованием по путепроводной развязке). Этот способ используется на таких зарубежных пассажирских станциях тупикового типа, как Париж-Северный, Цюрих-Главный, Франкфурт-на-Майне-Главный и др., а также частично на станции Москва-Пассажирская-Казанская. Если к тупиковой пассажирской станции примыкает нескольких пар главных путей, то на каждую пару может быть устроена своя такая развязка. Однако в большинстве случаев место для сооружения путепроводных развязок отсутствует.

Взамен путепроводной развязки может использоваться шлюзовая путь (рис. 1в). Этот способ позволяет повысить пропускную способность стрелочной горловины по сравнению с исходным вариантом (см. рис. 1а) лишь незначительно — благодаря увеличению маневренности и надежности работы стрелочной горловины. Дежурный по станции в зависимости от фактического положения прибывающего поезда может выбирать вариант маршрута для отправляемого поезда так, чтобы развести пересечение маршрутов их следования во времени.

Один из способов повышения пропускной способности стрелочной горловины тупиковой станции — сокращение ее длины и использование пологих марок стрелочных переводов (рис. 1з). Межпоездной интервал I можно снизить, если уменьшить длину стрелочной горловины и увеличить скорость движения. Чтобы уменьшить длину стрелочной горловины, необходимо сократить количество приемоотправочных путей, значительно сократить продолжительность стоянки конечных электропоездов по обороту, высадке и посадке пассажиров, и отказаться от использования в стрелочной горловине параллельных ходов.

Современные технологии диагностики подвижного состава и опробования тормозов позволяют сократить продолжительность оборота моторвагонных составов пригородных электропоездов с текущих 12–15 до 5 мин, что обеспечивает снижение потребности в приемоотправочных путях для оборота пригородных электропоездов более чем в 2 раза. В этом случае требуется также проверка пропускной способности пешеходных коммуникаций и пассажирских платформ. На рис. 1з показано расположение приемоотправочных путей и платформ, обеспечивающих посадку и высадку пассажиров с обеих сторон пригородного электропоезда. В противоположной стороне от поперечной распределительной платформы предусмотрен дополнительный подземный или надземный распределительный конкорс, позволяющий рассредоточить пассажиропотоки.

Скорости движения по стрелочной горловине можно увеличить в 2 и более раз за счет применения стрелочных переводов пологих марок (1/11) и полного отказа от использования перекрестных стрелочных переводов.

СХЕМНОЕ РЕШЕНИЕ ПО СОКРАЩЕНИЮ ДЛИН СТРЕЛОЧНЫХ ГОРЛОВИН СТАНЦИИ МОСКВА-ПАССАЖИРСКАЯ-ЯРОСЛАВСКАЯ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПРИГОРОДНЫХ И ПРИГОРОДНО-ГОРОДСКИХ ПОЕЗДОВ

В Московском железнодорожном узле с 2019 г. реализуются проекты по развитию пригородно-городских перевозок на инфраструктуре общего пользования. Интенсификация пригородно-городских перевозок на радиальных направлениях происходит одновременно с диаметрализацией движения, т.е. с отказом от оборота пригородных электропоездов на головных тупиковых станциях. Это утверждение применимо к первым четырем маршрутам МЦД, но Ярославское и Павелецкое направления по объективным причинам в обозримом будущем останутся тупиковыми. В силу данных обстоятельств высока вероятность открытия движения по пятому маршруту диаметра изолированно друг от друга с оборотом пригородных поездов на головных тупиковых станциях.

Для обеспечения возможности оборота заданных размеров движения предложена схема реконструкции станции Москва-Пассажирская-Ярославская. На рис. 2 в качестве примера представлен целевой шестипутный вариант путевого развития Ярославского направления Московского железнодорожного узла на участке Москва — Мытищи. По данной схеме на станции Москва-Пассажирская-Ярославская применяется жесткая специализация путей, при которой пути с 1а по 6 специализируются для приема и отправления дальних пассажирских и ускоренных пригородных поездов, пути с 7 по 11 — для приема и отправления пригородно-городских поездов, следующих по маршруту Москва — Пушкино и далее, а пути с 12 по 16 — для приема и отправления пригородно-городских поездов, следующих по маршруту Москва — Болшево и далее.

Таким образом, для оборота составов пригородно-городских поездов Пушкинского и Болшевского направлений на станции выделено по пять приемоотправочных путей. При этом в каждой секции, обслуживающей соответственно Пушкинское и Болшевское направления, предложено радикальное сокращение длины стрелочной горловины до 280 м (с текущих 850 м, при этом предусмотрено использование обычных стрелочных переводов марки 1/11 вместо перекрестных стрелочных переводов марки 1/9), что обеспечивает минимально допустимый межпоездной интервал 3,5 мин.

При уменьшении межпоездного интервала увеличивается интенсивность поступления составов пригородно-городских поездов на тупиковую станцию. В таких условиях необходимо обеспечить снижение времени оборота пригородно-городских электропоездов. Добиться этого можно за счет следующих технологических решений.

1. Локомотивные бригады не закрепляются за составами пригородных электропоездов. После прибытия состава на станцию оборота в хвостовой вагон заходит локомотивная бригада, которая принимает электропоезд. В этом случае не затрачивается время, необходимое для перехода локомотивных бригад из головного вагона в хвостовой. Локомотивная бригада прибывшего пригородного электропоезда отправляется уже с другим составом.

2. Использование новых систем диагностики подвижного состава, в том числе тормозной системы, не требующих визуального осмотра экипажной части локомотивной бригадой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение пропускной способности пассажирских станций необходимо прежде всего при интенсификации движения, когда интервалы между прибывающими поездами достигают 3,5–4 мин.

Методы повышения пропускной способности, описанные в статье, позволяют достичь различных эффектов.

Так, сооружение шлюзового пути, с одной стороны, фактически повышает не пропускную способность, а надежность выполнения графика движения, но, с другой стороны, требует минимальных капитальных вложений.

Строительство путепроводной развязки дает больший эффект, однако в данном случае необходимо больше инвестиций и не всегда существуют условия для ее сооружения в плотной городской застройке.

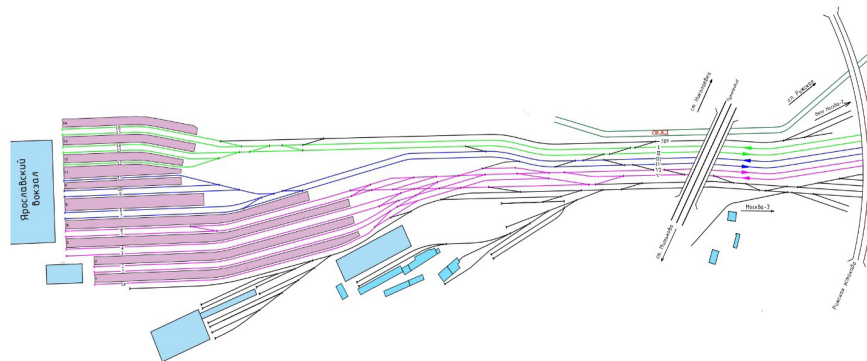


Рис. 2. Предлагаемая схема реконструкции станции Москва-Пассажирская-Ярославская:
— пути, специализированные для пригородно-городского движения (поездов МДЦ) на участке Москва Пасс.-Ярославская – Болшево (Фрязино-Пасс.); — пути, специализированные для пригородно-городского движения (поездов МДЦ) на участке Москва Пасс.-Ярославская – Пушкино и далее; — пути, специализированные для движения пассажирских поездов дальнего следования и дальнепригородных пассажирских электропоездов; — прочие пути

Повышение пропускной способности стрелочной горловины возможно за счет сокращения ее длины и увеличения по ней скоростей движения. Но для этого требуется реконструкция горловины, предусматривающая применение обычных стрелочных переводов полных марок и одновременно уменьшение количества используемых путей, кото-

рое достигается сокращением продолжительности оборота составов пригородно-городских поездов.

Повышение скорости движения поездов по прибытию на тупиковые приемоотправочные пути требует использования амортизирующих замедлителей и специальных автоматических устройств контроля скорости.

Литература

1. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учебник / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич [и др.] ; под ред. Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. Москва : УМЦ ЖДТ, 2012. 1086 с.
2. Абдуллаев И. С. Обоснование мероприятий по увеличению пропускной способности пассажирских станций : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2016. 181 с.
3. Евреенова Н. Ю., Роменский Д. Ю., Калинин К. А. Совершенствование системы пропуска электропоездов на участках с интенсивным движением // Вестник РГУПС. 2021. № 1 (81). С. 88–96. DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_88. ISSN 0201-727X.
4. Сотников Е. А., Холоднык П. С. Эффективность повышения скорости движения поездов по стрелочным горловинам станций на боковой путь // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 1. С. 25–29. ISSN 2223-9731.
5. Пазойский Ю. О., Вакуленко С. П., Колин А. В. Организация пригородных железнодорожных перевозок : учебное пособие / Под ред. Ю. О. Пазойского. Москва : УМЦ ЖДТ, 2015. 270 с.
6. Роменский Д. Ю., Калинин К. А. Пропуск электропоездов диаметральных маршрутов через центральную часть транспортных узлов // Вестник СГУПС. 2021. № 2 (57). С. 24–32. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_24. ISSN 1815-9265.
7. Московский транспортный узел: перспективы развития / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Д. Ю. Роменский [и др.]. Москва : ВНИИТИ РАН, 2020. 208 с.

References

1. Design of railway transport infrastructure (stations, railway and transport hubs) [Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly)] : textbook / N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko, A. K. Golovnich [et al.] ; ed. by N. V. Pravdin and S. P. Vakulenko. Moscow : UMTs ZhDT, 2012. 1086 p.
2. Abdullaev I. S. Justification of measures to increase the capacity of passenger stations [Obosnovanie meropriyatiy po uvelicheniyu propusknoy sposobnosti passazhirskikh stantsiy] : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2016. 181 p.
3. Evreenova N. Yu., Romenskiy D. Yu., Kalinin K. A. Improvement of the electric train passage system in the sites with intensive traffic [Sovershenstvovanie sistemy propuska elektropoezdov na uchastkakh s intensivnym dvizheniem] // Vestnik RGUPS. 2021. № 1 (81). Pp. 88–96. DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_88. ISSN 0201-727X.
4. Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S. Efficiency of increasing the speed of movement of trains along the switch necks of stations on the side track [Effektivnost' povysheniya skorosti dvizheniya poezdov po strelochnym gorlovinam stantsiy na bokovoy put'] // VNIIZhT Scientific Journal. 2014. No. 1. Pp. 25–29. ISSN 2223-9731.
5. Pazoyskiy Yu. O., Vakulenko S. P., Kolin A. V. Organization of commuter traffic [Organizatsiya prigorodnykh zheleznodorozhnykh perevozok] : textbook / Ed. by Yu. O. Pazoyskiy. Moscow : UMTs ZhDT, 2015. 270 p.
6. Romenskiy D. Yu., Kalinin K. A. Electric trains passage of diameter routes through the transport hub central part [Propusk elektropoezdov diameteral'nykh marshrutov cherez tsentral'nyuy chast' transportnykh uzlov] // The Siberian Transport University Bulletin. 2021. No. 2 (57). P. 24–32. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_24. ISSN 1815-9265.
7. The Moscow transport node: prospects of development [Moskovskiy transportnyy uzel: perspektivy razvitiya] / S. P. Vakulenko, A. V. Kolin, D. Yu. Romenskiy [et al.]. Moscow : The All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the RAS, 2020. 208 p.

УДК 656.1

Александр Валериевич Мартыненко, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), старший научный сотрудник Центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УрО РАН), Екатеринбург, Россия,

Елена Геннадьевна Филиппова, старший преподаватель кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖДУГОРОДНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОЕЗДОК НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СЕРВИСОВ КАРПУЛИНГА

Alexander Valerievich Martynenko, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Senior Researcher, Productive Forces Development and Placement Centre, Institute of Economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences (IE UB RAS), Ekaterinburg, Russia,

Elena Gennadyevna Filippova, Senior Lecturer, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Modeling of spatial distribution of intercity automobile trips on the basis of carpooling services data

Аннотация

Рассмотрено пространственное распределение автомобильных транспортных потоков между городами Свердловской области. Для его описания использована матрица корреспонденций, элементы которой представлены числом поездок между каждой парой городов. Расчет элементов матрицы корреспонденций выполнен по известным суммарным отправлениям и прибытиям с помощью транспортной гравитационной модели.

Исходными данными для калибровки гравитационной модели послужила информация, полученная на онлайн-сервисе поиска автомобильных попутчиков (карпулинг). Рассмотрена гравитационная модель с показательной функцией тяготения, при калибровке использован метод Хаймана.

Выполнен анализ наблюдаемой и расчет модельной матриц корреспонденций. Сравнение абсолютных отклонений значений элементов модельной и наблюдаемой матриц, а также сопоставление модельного и наблюдаемого распределений длины поездки показало, что гравитационная модель с показательной функцией тяготения адекватно описывает пространственное распределение количества поездок, представленных на онлайн-сервисе поиска автомобильных попутчиков.

Ключевые слова: транспортная сеть, карпулинг, гравитационная модель, матрица корреспонденций, функция тяготения, итерационный метод.

Summary

The paper considers a spatial distribution of automobile traffic between cities of the Sverdlovsk region. For its description the authors have applied a correspondence matrix represented by the number of trips between each pair of cities. A calculation of elements of correspondence matrix is carried out by known total departures and arrivals with the use of a transport gravity model.

As initial data for calibration of the gravity model the authors have used the information gained on the online-service for searching fellow travellers (carpooling). The paper considers the gravity model with an exponential gravity function. At calibration the authors have used the Hyman method.

As a result, the authors have carried out an analysis of the observed correspondence matrix and a calculation of the modeling one. A comparison of absolute deviations of element values for the modeling and the observed matrices and a comparison of the modeling and the observed distributions of trip length have showed that the gravity model with the exponential gravity function adequately represents the spatial distribution of trips presents on the online-service for searching fellow travellers.

Keywords: transport network, carpooling, gravity model, correspondence matrix, gravity function, iterative method.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-33-38

33

Июль – Сентябрь

ВВЕДЕНИЕ

Для получения информации о транспортных потоках в региональной транспортной системе используют натурные измерения, которые требуют значительных временных затрат и являются весьма трудоемкими (наблюдение, сбор, обработка и анализ полученных данных). Однако такая информация нужна для расчета матрицы корреспонденций. В свою очередь, матрица корреспонденций необходима при расчете различных параметров функционирования транспортной инфраструктуры: с ее помощью можно определить степень загруженности участков дорожной сети, вычислить среднюю продолжительность (длину) поездки, оценить интенсивность транспортных потоков и, следовательно, выделить наиболее значимые маршруты, направления и узлы транспортной сети. Например, в работе [1] на основе матрицы корреспонденций проанализирована информация о пассажиропотоках по станциям метрополитена, а в [2] матрица корреспонденций используется для составления наиболее эффективного расписания движения.

В настоящее время для расчета элементов матрицы корреспонденций применяют различные математические модели. В данной работе рассмотрим наиболее распространенную — гравитационную модель автомобильной региональной сети. Основной принцип этой модели можно сформулировать следующим образом: большие и близкие объекты взаимодействуют сильнее, чем маленькие и далекие [3, 4]. По аналогии с ньютоновским законом всемирного тяготения, согласно которому тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, в наиболее простой (и исторически самой первой [3]) форме гравитационная модель имеет следующий вид:

$$p_{ij} = k \frac{s_i d_j}{c_{ij}^2}, \quad i \in S, j \in D, \quad (1)$$

где p_{ij} — количество автомобилей, совершающих поездку между пунктами $i \in S$ и $j \in D$ (в автомобильной региональной дорожной сети аналогом притягивающихся тел выступают пункты отправления $i \in S$ и прибытия $j \in D$, S и D — множество пунктов отправления и прибытия некоторого региона соответственно);

s_i — суммарное количество автомобилей, выезжающих из пункта $i \in S$;

d_j — суммарное количество автомобилей, въезжающих в пункт $j \in D$;

c_{ij} — обобщенная стоимость поездки из пункта $i \in S$ в пункт $j \in D$ (учитывает непосредственно стоимость поездки, ее продолжительность, затраты времени на ожидание, уровень комфорта транспортного средства и т.п., является аналогом расстояния между телами и с помощью размерных коэффициентов может быть выражена как в денежных единицах, так и в единицах времени);

$k > 0$ — калибровочный коэффициент, размерность — (единица стоимости)²/количество автомобилей.

Расчет матрицы корреспонденций на основе гравитационной модели зависит от того, какие данные наблюдений доступ-

ны. Обычно модельную матрицу корреспонденций вычисляют при известных суммарных отправлениях и прибытиях s_i и d_j . Они могут быть получены по данным наблюдений, и их достаточно, чтобы рассчитать матрицу корреспонденций на основе гравитационной модели.

Если известны не только суммарные отправления и прибытия, но еще и некоторые элементы матрицы корреспонденций, это позволяет не просто рассчитать модельную матрицу корреспонденций, а проверить, насколько точно модель описывает реальность. Для такой проверки необходимо сравнить элементы матрицы корреспонденций, известные из наблюдений, с соответствующими элементами модельной матрицы. Понятно, что чем больше элементов матрицы корреспонденций известно, тем более точной будет проверка.

В своем исследовании мы используем наблюдаемую матрицу корреспонденций, в которой известны значения всех ее элементов. Такая матрица была нами получена на основе данных сервисов карпулинга.

Карпулинг (райдшеринг) — это совместное использование частного автомобиля с помощью онлайн-сервисов поиска попутчиков. Сегодня среди водителей и пассажиров большой популярностью пользуются крупнейший международный сервис карпулинга BlaBlaCar и Едем.рф — сервис поиска попутчиков для совместных автомобильных поездок по России. Автовладелец на соответствующем сервисе размещает информацию о дате и времени поездки, пунктах отправления и прибытия, указывает марку машины и количество свободных мест. Пассажир в свою очередь выбирает нужное объявление и становится попутчиком. Вместе с тем автовладелец практически не зависит от наличия или отсутствия попутчика, и, даже если на размещенное объявление никто не откликнулся, поездка в любом случае состоится. Следовательно, объявления водителей о поездках могут быть использованы для получения наблюдаемой матрицы корреспонденций.

Соответственно основная цель настоящего исследования заключается в том, чтобы по данным сервиса карпулинга рассчитать матрицу корреспонденций с помощью гравитационной модели и проверить, насколько близка полученная модельная матрица к наблюдаемой матрице корреспонденций, т.е. насколько хорошо объемы карпулинговых корреспонденций описываются гравитационной моделью.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ

Применению и изучению гравитационной модели для описания транспортных потоков посвящено довольно много работ. На первоначальном этапе в большинстве исследований использовалась непосредственно модель (1). Однако достаточно быстро выяснилось, что модель в классической форме (1) имеет существенные недостатки [3]. Например, при вычислении интенсивности поездок между парой городов сети не учитывается значимость населенных пунктов, расположенных рядом, а наличие в составе формулы квадрата расстояния между двумя пунктами не отражает реальный приоритет автомобильных поездок. Поэтому в современных исследованиях (например, [5, 6]) гравитационную модель матрицы корреспонденций обычно записывают в виде

$$\begin{cases} p_{ij} = \alpha_i \beta_j s_i d_j f(c_{ij}), i \in S, j \in D, \\ \alpha_i = \left(\sum_{j \in D} \beta_j d_j f(c_{ij}) \right)^{-1}, \\ \beta_j = \left(\sum_{i \in S} \alpha_i s_i f(c_{ij}) \right)^{-1}, \end{cases} \quad (2)$$

где α_i и β_j — калибровочные коэффициенты,
 $f(c_{ij}) = e^{-\gamma c_{ij}}$ — функция тяготения.

При этом предполагается выполнение условия совместности системы (2)

$$\sum_{i \in S} s_i = \sum_{j \in D} d_j.$$

Подробную информацию об основных математических свойствах модели (2) можно найти в работах [7–10].

Как видно из вида модели (2), исходными данными для калибровки модели являются величины s_i, d_j, c_{ij} , которые получены в результате наблюдений. Параметры α_i, β_j (при известном параметре γ) можно оценить по методу Фратара, а для оценки параметра γ применяется метод Хаймана.

Метод Фратара [11] используется для вычисления α_i и β_j при известном значении параметра γ . Он представляет собой итерационный метод решения нелинейной системы уравнений

$$\begin{cases} \alpha_i = \left(\sum_{j \in D} \beta_j d_j f(c_{ij}) \right)^{-1}, \\ \beta_j = \left(\sum_{i \in S} \alpha_i s_i f(c_{ij}) \right)^{-1}. \end{cases} \quad (3)$$

Согласно методу Фратара, результаты вычислений каждой промежуточной итерации служат исходными данными для последующей. Так, на первой итерации определяют начальные значения коэффициентов $\beta_j = \frac{1}{d_j}$ для всех j и после их подста-

новки в первое из уравнений (3) вычисляют коэффициенты α_i . Затем по этим найденным коэффициентам α_i на второй итерации определяют параметры β_j с помощью второго из уравнений (3). Далее снова используют первое из уравнений (3) для вычисления новых значений α_i , и процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность.

Как уже было сказано, при вычислении параметра γ используется метод Хаймана [8, 10]. Для его реализации необходима дополнительная характеристика C^* — средняя обобщенная стоимость поездки, которая может быть получена в результате наблюдений. Основная идея метода Хаймана заключается в следующем: на нулевой итерации задается значение $\gamma = \gamma_0 = \frac{1}{C^*}$, затем для него с помощью вышеописанного алгоритма Фратара вычисляются калибровочные коэффициенты α_i и β_j , по ко-

торым определяются все корреспонденции p_{ij} . На основании найденной матрицы корреспонденций можно вычислить модельное значение средней обобщенной стоимости поездки, соответствующее γ_0 :

$$C(\gamma_0) = \frac{\sum_{i,j} p_{ij}(\gamma_0) \cdot c_{ij}}{\sum_{i,j} p_{ij}(\gamma_0)}. \quad (4)$$

Если $C(\gamma_0)$ совпало с C^* в пределах заданной точности, то параметр γ для функции тяготения найден. В противном случае необходимо перейти к первой итерации, для которой полагаем

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_0 \cdot C_0}{C^*}.$$

Затем, используя равенство (4), вычисляем $C(\gamma_1)$ и сравниваем его с C^* . Если $C(\gamma_1)$ совпало с C^* в пределах заданной точности, то параметр γ для функции тяготения считаем найденным, в противном случае переходим ко второй итерации, на которой полагаем

$$\gamma_2 = \frac{(C^* - C_0) \cdot \gamma_1 - (C^* - C_1) \cdot \gamma_0}{C_1 - C_0}.$$

На третьей и последующих итерациях полагаем

$$\gamma_n = \frac{(C^* - C_{n-2}) \cdot \gamma_{n-1} - (C^* - C_{n-1}) \cdot \gamma_{n-2}}{C_{n-1} - C_{n-2}}. \quad (5)$$

Процесс будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнуто совпадение $C(\gamma_n)$ и C^* с заданной точностью.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

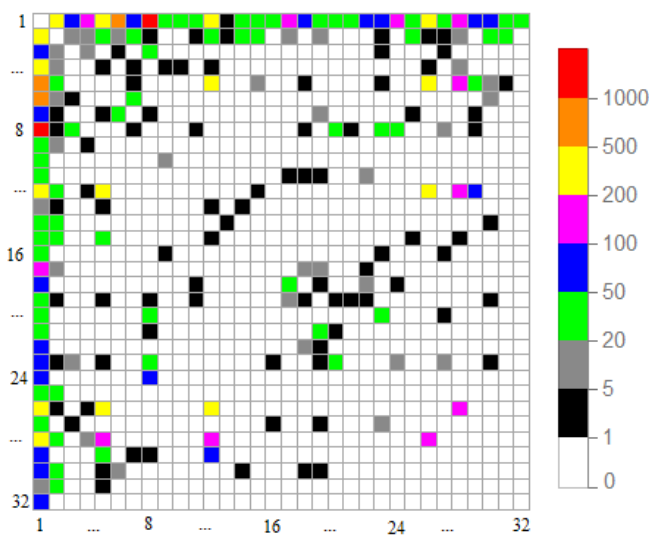
Для калибровки модели (2) использованы данные о потоках автомобилей между 32 городами Свердловской области с населением более 20 тыс. чел. (992 корреспонденции). В качестве источника информации о количестве поездок между всеми парами указанных городов взяты материалы карпулинг-сервиса Едем.рф [12]. Ежедневный сбор материалов о поездках проводился на протяжении четырех месяцев 2021 г. (с 1 февраля по 31 мая) в одно и то же время суток. Сервис Едем.рф содержит данные по каждой поездке, необходимые для калибровки модели (2). Фрагмент этих данных представлен в табл. 1 (объявления на Едем.рф содержат также сведения о водителе и автомобиле, однако в рамках нашего исследования эта информация не использовалась).

Итак, были получены сведения о 19683 автомобильных поездках. Причем для большинства из 992 направлений за четыре месяца наблюдений не было зафиксировано ни одного объявления о поездке. Количество направлений с нулевым числом поездок равно 223. Таким образом, матрица $P_{ij}^{\text{набл}}$ наблюдаемого числа поездок рассматриваемой региональной транспортной сети содержит 78 % нулевых корреспонденций (рис. 1).

Таблица 1

Фрагмент данных сервиса Едем.рф

Откуда	Куда	Дата отправления	Время отправления	Время прибытия	Цена поездки, руб.	Время в пути
Серов	Екатеринбург	09 фев.	8:39	12:58	550	4:19
Красноуральск	Екатеринбург	09 фев.	8:00	12:58	650	4:58
Екатеринбург	Сухой Лог	09 фев.	11:45	13:27	180	1:42
Североуральск	Екатеринбург	09 фев.	7:00	12:38	900	5:38
Екатеринбург	Среднеуральск	09 фев.	10:15	10:46	100	0:31



- | | | | |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 1. Екатеринбург | 9. Ревда | 17. Алапаевск | 25. Кушва |
| 2. Нижний Тагил | 10. Полевской | 18. Реж | 26. Карпинск |
| 3. Каменск-Уральский | 11. Березовский | 19. Ирбит | 27. Камышлов |
| 4. Первоуральск | 12. Красноуральск | 20. Сухой Лог | 28. Североуральск |
| 5. Серов | 13. Лесной | 21. Тавда | 29. Среднеуральск |
| 6. Новоуральск | 14. Верхняя Салда | 22. Артемовский | 30. Невьянск |
| 7. Верхняя Пышма | 15. Качканар | 23. Богданович | 31. Красноуральск |
| 8. Асбест | 16. Красноуфимск | 24. Заречный | 32. Сысерть |

Рис. 1. Наблюдаемая матрица корреспонденций

Как видно из рис. 1, больше всего поездок осуществляется по направлениям Асбест — Екатеринбург, Екатеринбург — Новоуральск, Новоуральск — Екатеринбург и Серов — Екатеринбург. Кроме того, за указанный период для каждого из рассматриваемых городов совершались поездки в Екатеринбург и из Екатеринбурга. Причем наблюдаемая матрица корреспонденций имеет две особенности:

- 1) очень большое количество нулевых элементов;
- 2) аномально высокое число поездок между Екатеринбургом и Асбестом.

Вторая из отмеченных особенностей не может быть объяснена социально-экономическими и пространственными факторами и, по всей видимости, является следствием того, что сервис Едем.рф имеет разную популярность в различных городах. Отсюда следует, что число объявлений на сайте Едем.рф слабо коррелирует с общим количеством поездок для этих городов. Вместе с первой особенностью это означает, что элементы полученной нами наблюдаемой матрицы корреспонденций

слабо коррелируют с элементами матрицы корреспонденций всех автомобильных поездок для рассматриваемых городов.

В качестве обобщенной стоимости поездки c_{ij} в настоящей работе используется расстояние между городами i и j (расстояние между всеми парами пунктов рассматриваемой транспортной сети взяты с автотранспортного портала transler.ru [13]).

Для реализации метода Хаймана при вычислении модельной матрицы корреспонденций необходимо значение C^* — наблюдаемой средней длины поездки, которая определяется на основе наблюдаемых значений c_{ij} и p_{ij} по формуле

$$C^* = \frac{\sum_{i,j} p_{ij} \cdot c_{ij}}{\sum_{i,j} p_{ij}} \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В настоящей работе для первичной обработки и анализа исходных данных, а также для вычисления модельной матрицы корреспонденций P_{ij}^{MOD} с помощью метода Хаймана использована вычислительная среда Wolfram Mathematica.

Для калибровки гравитационной модели (2) на основе наблюдаемой матрицы корреспонденций получены векторы $\{s_1, s_2, \dots, s_{32}\}$ и $\{d_1, d_2, \dots, d_{32}\}$, соответствующие суммарному количеству выезжающих и въезжающих автомобилей. Кроме того, на основе матрицы расстояний вычислена наблюдаемая средняя длина поездки ($C^* = 138,356$ км). Затем методом Хаймана найден параметр γ для функции тяготения $f(c_{ij})$ и рассчитана модельная матрица корреспонденций P_{ij}^{MOD} . Реализация метода Хаймана потребовала всего пять итераций для нахождения γ при условии, что модельная средняя длина поездки отличается от наблюдаемой средней длины поездки менее чем на 0,1 км (при этом на каждой из пяти итераций метода Хаймана выполнено 10 итераций для нахождения 64 калибровочных коэффициентов методом Фратора).

Чтобы оценить качество полученной модельной матрицы, выполнен сравнительный анализ элементов наблюдаемой $P_{ij}^{набл}$ и модельной P_{ij}^{MOD} матриц корреспонденций. Для этого проанализирована матрица $|P_{ij}^{набл} - P_{ij}^{MOD}|$, элементами которой являются абсолютные погрешности соответствующих корреспонденций. Суммарная величина всех таких 1024 отклонений составила 5096,76, причем средняя абсолютная погрешность оказалась близка к пяти поездкам. Значения пяти наиболее сильных отклонений между наблюдаемыми и модельными корреспонденциями с указанием соответствующих направлений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Корреспонденции с наиболее высокими абсолютными погрешностями

Направление	$ P_{ij}^{набл} - P_{ij}^{мод} $
Асбест — Екатеринбург	334,451
Екатеринбург — Асбест	228,004
Нижний Тагил — Екатеринбург	164,566
Екатеринбург — Нижний Тагил	141,228
Богданович — Екатеринбург	87,042

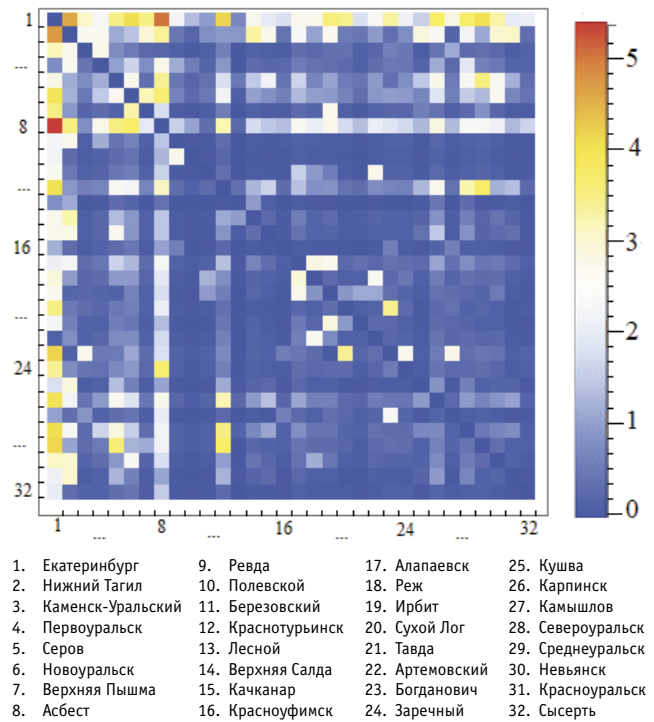
Таким образом, результаты моделирования для отдельных элементов матрицы крайне неоднородны с точки зрения точности: на каких-то направлениях погрешность составляет сотни поездок, а на каких-то близка к нулю. Пространственное распределение абсолютных различий между наблюдаемыми и модельными значениями представлено на рис. 2 (нумерация городов сохранена).

Из рис. 2 следует, что достаточно большое количество корреспонденций модельной матрицы совпадает с наблюдаемыми данными. Из гистограммы рис. 3, на которой показано частотное распределение абсолютной погрешности, видно, что более чем для 600 корреспонденций отличия составляют 1–2 поездки, а для 800 корреспонденций — не более 5 поездок. То есть можно сделать вывод о достаточно сильной близости наблюдаемой и модельной матриц корреспонденций.

При сравнении наблюдаемой и модельной матриц корреспонденций очень важно, чтобы наблюдаемое и модельное распределения длины поездки были близки. Дело в том, что алгоритм метода Хаймана обеспечивает равенство средней наблюдаемой и средней модельной длин поездок. Но из этого совсем не обязательно должно следовать равенство (близость) распределений. Однако в данном случае наблюдаемое и модельное распределения длины поездки демонстрируют очень высокий уровень сходства (рис. 4). Это свидетельствует о высокой степени близости модельной и наблюдаемой матриц корреспонденций и соответственно о том, что гравитационная модель хорошо описывает пространственное распределение поездок, данные о которых представлены на сервисах карпулинга.

ВЫВОДЫ

Основной вывод, который можно сделать на основе полученных результатов, заключается в том, что пространственное распределение поездок, объявления о которых размещены на онлайн-сервисе поиска попутчиков Едем.рф, хорошо описываются гравитационной моделью с показательной функцией тяготения. Причем адекватность модели наблюдаемым данным следует не только из анализа пространственного и частотного распределения абсолютных погрешностей для отдельных элементов наблюдаемой и модельной матриц корреспонденций, но и из сравнения распределений длины поездки — они оказались очень близки для наблюдаемых и модельных данных.



- 1. Екатеринбург
- 2. Нижний Тагил
- 3. Каменск-Уральский
- 4. Первоуральск
- 5. Серов
- 6. Новоуральск
- 7. Верхняя Пышма
- 8. Асбест
- 9. Ревда
- 10. Полевской
- 11. Березовский
- 12. Краснотурьинск
- 13. Лесной
- 14. Верхняя Салда
- 15. Качканар
- 16. Краснофимск
- 17. Алапаевск
- 18. Реж
- 19. Ирбит
- 20. Сухой Лог
- 21. Тавда
- 22. Артемовский
- 23. Богданович
- 24. Заречный
- 25. Кушва
- 26. Карпинск
- 27. Камышлов
- 28. Североуральск
- 29. Среднеуральск
- 30. Невьянск
- 31. Красноуральск
- 32. Сысерть

Рис. 2. Визуализация матрицы $|P_{ij}^{набл} - P_{ij}^{мод}|$ (в логарифмической шкале)

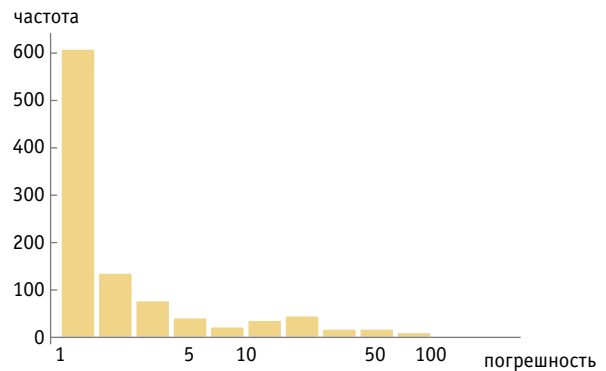


Рис. 3. Частотное распределение погрешности $|P_{ij}^{набл} - P_{ij}^{мод}|$ (логарифмический масштаб по горизонтальной оси)

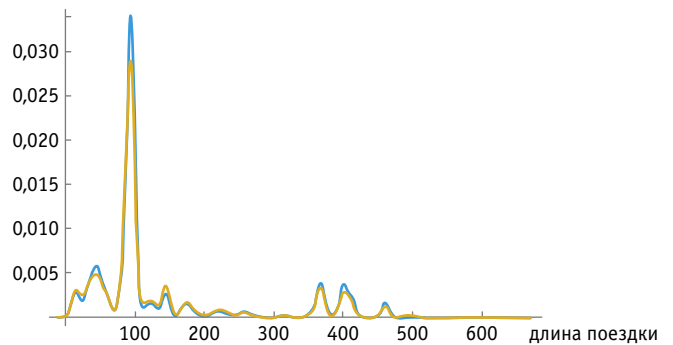


Рис. 4. Сглаженная гистограмма распределений наблюдаемых и модельных значений длины поездки: — наблюдаемая длина поездки; — модельная длина поездки

В то же время из проведенного анализа следует, что элементы матрицы корреспонденций, полученной на основе данных с сервисов карпулинга, могут слабо коррелировать с элементами матрицы корреспонденций всех автомобильных поездок. Это значит, что результаты, полученные при помощи данных с сервисов поиска попутчиков, не всегда можно использовать для анализа транспортной системы региона.

Статья подготовлена в соответствии с планом НИР УрГУПС (НИР, выполняемая в рамках госзадания «Оптимизация транспортно-логистической системы на основе моделирования развития транспортной инфраструктуры и моделей потребительских предпочтений» № 121050500050–5).

Литература

1. Матрицы корреспонденций и анализ пассажирских потоков / Д. Е. Намиот, М. Н. Некрапленная, О. Н. Покусаев, А. Е. Чекарев // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Vol. 8. No. 4. Pp. 25–30. ISSN 2307–8162.
2. Тарханова Н. В., Михайлов А. Ю., Яценко С. А. Теоретический обзор моделей обновления матриц корреспонденций // Вестник ИрГТУ. 2014. № 6 (89). С. 155–157. ISSN 1814–3520.
3. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling Transport. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 606 p.
4. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учебное пособие / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.]; под ред. А. В. Гасникова. Москва : МФТИ, 2010. 360 с.
5. Мартыненко А. В., Филиппова Е. Г. Анализ свойств гравитационной модели пассажирских перевозок для линейной сети // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 23–28. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-23-28. ISSN 1815–9400.
6. Тимофеева Г. А., Ие О. Н. Применение синтетической гравитационной модели с показательно-степенной функцией тяготения для расчета расщепления пассажиропотока по разным видам общественного транспорта // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9. ISSN 1815–9400.
7. Erlander S., Stewart N. F. The Gravity Model in Transportation Analysis: Theory and Extensions. VSP, 1990. 226 p.
8. Evans A. W. Some properties of trip distribution methods. Pergamon Press, 1970.
9. Evans A. W. The calibration of trip distribution models with exponential or similar cost functions. Pergamon Press, 1971.
10. Hyman G. M. The calibration of trip distribution models // Environment and Planning. 1969. 1. Pp. 105–112.
11. Furness K. P. Time function iteration // Traffic Engineering and Control. 1965. 7. Pp. 458–460.
12. Совместные поездки на автомобиле. URL: <https://xn-d1abb2a.xn-p1ai/> (дата обращения: 07.06.2021).
13. Расстояние между городами. URL: <http://transler.ru/navigator/calc/> (дата обращения: 15.05.2021).

References

1. OD-matrix and passenger flow analysis [Matritsy korrespondentsiy i analiz passazhirsikh potokov] / D. E. Namiot, M. N. Nekraplennaya, O. N. Pokusaev, A. E. Chekmarev // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Vol. 8. No. 4. Pp. 25–30. ISSN 2307–8162.
2. Tarkhanova N. V., Mikhaylov A. Yu., Yatsenko S. A. Theoretical review of correspondence matrix updating models [Teoreticheskiy obzor modeley obnovleniya matrits korrespondentsiy] // Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2014. No. 6 (89). Pp. 155–157. ISSN 1814–3520.
3. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling Transport. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 606 p.
4. Introduction to modeling of traffic flows [Vvedeniye v modelirovaniye transportnykh potokov] : textbook / A. V. Gasnikov, S. L. Klenov, E. A. Nurminskiy [et al.]; ed. by A. V. Gasnikov. Moscow : Moscow Institute of Physics and Technology, 2010. 360 p.
5. Martynenko A. V., Filippova E. G. Analysis of properties of passenger traffic gravity model for linear network [Analiz svoystv gravitatsionnoy modeli passazhirsikh perevozok dlya lineynoy seti] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 23–28. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-23-28. ISSN 1815–9400.
6. Timofeeva G. A., Ie O. N. Application of synthetic gravity model with exponential-power gravity function for calculation of passenger traffic splitting by different modes of public transport [Primeneniye sinteticheskoy gravitatsionnoy modeli s pokazatel'no-stepennoy funktsiey tyagoteniya dlya rascheta rasshhepleniya passazhiropotoka po raznym vidam obshhestvennogo transporta] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9. ISSN 1815–9400.
7. Erlander S., Stewart N. F. The Gravity Model in Transportation Analysis: Theory and Extensions. VSP, 1990. 226 p.
8. Evans A. W. Some properties of trip distribution methods. Pergamon Press, 1970.
9. Evans A. W. The calibration of trip distribution models with exponential or similar cost functions. Pergamon Press, 1971.
10. Hyman G. M. The calibration of trip distribution models // Environment and Planning. 1969. 1. Pp. 105–112.
11. Furness K. P. Time function iteration // Traffic Engineering and Control. 1965. 7. Pp. 458–460.
12. Common trips in an automobile [Sovmestnye poezdki na avtomobile]. URL: <https://xn-d1abb2a.xn-p1ai/> (access date: 07.06.2021).
13. Distance between cities [Rasstoyaniye mezhdud gorodami]. URL: <http://transler.ru/navigator/calc/> (access date: 15.05.2021).

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 656.013

Евгений Викторович Козеев, кандидат физико-математических наук, генеральный директор
ООО Научно-производственная фирма «КостаТест», Новосибирск, Россия,

Олег Сергеевич Самошкин, кандидат технических наук, ведущий специалист
АО «Федеральная пассажирская компания», Москва, Россия,

Евгений Николаевич Попов, заведующий лабораторией систем жизнеобеспечения
пассажирских вагонов АО НО «Тверской институт вагоностроения», Тверь, Россия,

Валерий Евгеньевич Волков, ведущий инженер лаборатории систем жизнеобеспечения
пассажирских вагонов АО НО «Тверской институт вагоностроения», Тверь, Россия

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ДАТЧИКОВ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НАГРЕВА БУКС

Evgeniy Viktorovich Kozeev, PhD in Physics and Mathematics, General Director,
Scientific and Production Firm «KostaTest» LLC, Novosibirsk, Russia,

Oleg Sergeevich Samoshkin, PhD in Engineering, Principal Specialist, JSC «Federal Passenger Company», Moscow, Russia,

Evgeniy Nikolaevich Popov, Head of the Laboratory of Systems for Passenger Cars Life Support,
JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia,

Valeriy Evgenyevich Volkov, Principal Engineer of the Laboratory of Systems for Passenger Cars Life Support,
JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia

Development of tests of increased reliability sensors for inspection system of axle box heating

Аннотация

Все отечественные пассажирские вагоны с 1960 г. выпускаются только на тележках с роликовыми подшипниками. Переход на роликовые подшипники потребовал оснащения вагонов системами контроля нагрева букс (СКНБ), поскольку буксы могут нагреваться выше определенной температуры, из-за чего ухудшаются смазывающие свойства масла.

Главный элемент СКНБ — термодатчик — устанавливается на каждую буксу. В настоящее время на всех моделях люлечных тележек применяются термодатчики 393.

При внедрении новых безлюлечных тележек установка термодатчиков 393 на буксе проводилась через специальный латунный переходник. Наблюдения в эксплуатации показали недостаточную надежность СКНБ в безлюлечных тележках.

В связи с этим были проведены исследования по новым термодатчикам повышенной надежности, их опытная партия прошла предварительные и приемочные стендовые испытания. По результатам стендовых испытаний было принято решение о проведении подконтрольной эксплуатации на магистральных пассажирских вагонах. Подконтрольная эксплуатация с новыми датчиками осуществлялась на базе пассажирского вагонного депо Новосибирска, по ее результатам была установлена требуемая температура срабатывания СКНБ.

Ключевые слова: термодатчик, пассажирский вагон, стендовые испытания, подконтрольная эксплуатация, надежность.

Summary

All the domestic passenger cars since 1960 are produced only on bogies with roller bearings. A transition to roller bearings demanded the cars to be equipped with inspection system of axle box heating. It is necessary because axle box be heated over a specified temperature that leads to deterioration of the oil lubricity.

The main element of the inspection system of axle box heating is a thermal sensor that is installed on each axle box. Nowadays, bolster bogies of all models are equipped with type 393 thermal sensors.

At introduction of new bolsterless bogies the installation of the type 393 thermal sensors on the axle boxes was carried out with the use of special brass adapter. The observations in operation showed insufficient reliability of the inspection system of axle box heating in bolsterless bogies.

Consequently, the authors have carried out research on new increased reliability thermal sensors. The pilot batch has passed preliminary and acceptance rig tests. On the results of the rig tests it has been decided to carry out an under-control operation on mainline passenger cars. The under-control operation with new sensors has been carried out on the basis of the Novosibirsk passenger wagon depot. On the basis of its results the authors have established the required temperature of the inspection system of axle box heating actuation.

Keywords: thermal sensor, passenger car, rig tests, under-control operation, reliability.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-39-45

Буксовый узел — один из ответственных элементов ходовых частей подвижного состава. Он размещается на шейках осей колесных пар и предназначен для:

восприятия и передачи радиальных и осевых нагрузок, возникающих при движении вагонов, колесным парам;

защиты шеек осей колесных пар от загрязнений и повреждений;

ограничения продольных и поперечных перемещений колесных пар относительно рамы тележки.

Все отечественные пассажирские вагоны с 1960 г. выпускаются только на тележках с роликовыми подшипниками в буксовых узлах. Переход от подшипников скольжения на подшипники качения позволил получить значительный народнохозяйственный эффект [1].

Однако в процессе эксплуатации букса может нагреваться. Это происходит в результате неправильно установленного осевого и радиального зазора, некачественной или недостаточной смазки, а также скрытых дефектов при изготовлении подшипника качения. На температуру букс оказывает влияние и температура наружного воздуха.

Эксплуатационный перегрев элементов подшипников вызывает температурные деформации, в результате чего зазоры между ними уменьшаются, что может привести к защемлению роликов между кольцами и разрушению подшипника. В связи с этим для своевременного выявления неисправностей необходим постоянный контроль температуры нагрева буксовых узлов. Свойства смазки сохраняются до предельной температуры нагрева (100–120 °С), после чего может наступить лавинообразный процесс, вызывающий перегрев, заклинивание и разрушение подшипника. По результатам исследований, проведенных в США и подтвержденных статистическими данными ОАО «РЖД», при перегреве подшипника пробег вагона до излома шейки вала колесной пары составляет не более 60 км [2, 3]. Эта проблема представляет угрозу безопасности движения поездов.

Все пассажирские вагоны ОАО «РЖД» оборудованы системами контроля нагрева букс (СКНБ). Датчики измерения температуры установлены непосредственно на корпусе буксы. При достижении пре-

дельной температуры нагрева буксы на пульт управления вагона подаются световой и звуковой сигналы [4–6].

Кроме того, для выявления перегретых букс на перегонах участков с интенсивным движением и на подходах к станциям устанавливают приборы бесконтактного контроля температуры букс (ПОНАБ-3, ДИСК-БВК-Ц). Последние используются для контроля перегрева буксовых узлов грузовых составов, но не могут в полной мере обеспечить безопасность движения пассажирских составов из-за недопустимо большого расстояния между контрольными пунктами [7].

Таким образом, автоматизированная система контроля технического состояния буксовых узлов должна своевременно выявлять неисправности ходовых частей составов поездов, предупреждать о возникновении необратимых отказов, способных приводить к аварийным ситуациям, и тем самым повышать безопасность движения [8].

Главным рабочим элементом СКНБ являются термодатчики, которые устанавливаются в корпусе каждой буксы, а также в редукторе привода генератора от средней части оси колесной пары. Датчики изготавливаются отечественными предприятиями в соответствии с нормативным документом [9].

Внутри датчика концы двух проводов соединены легкоплавким сплавом. Принцип действия датчика основан на том, что при определенной температуре сплав расплавляется, в результате чего происходит разрыв электрической цепи, и автоматически подается сигнал проводнику вагона, свидетельствующий о перегреве подшипника в буксе или редукторе.

На рис. 1 показано устройство термодатчика 393.

Двухжильный провод 1 подведен в корпус 2 термодатчика. Место ввода провода в корпус герметизировано путем завальцовки. Концы провода 1 проходят через изоляционную эбонитовую втулку 3, которая предохраняет замыкание концов провода с корпусом датчика и между собой. Внутри эбонитовой втулки 3 имеется специальная канавка 4, в которую выведены и развальцованы концы 5 двухжильного провода. При заполнении канавки специальным легкоплавким сплавом концы двухжильного провода оказы-

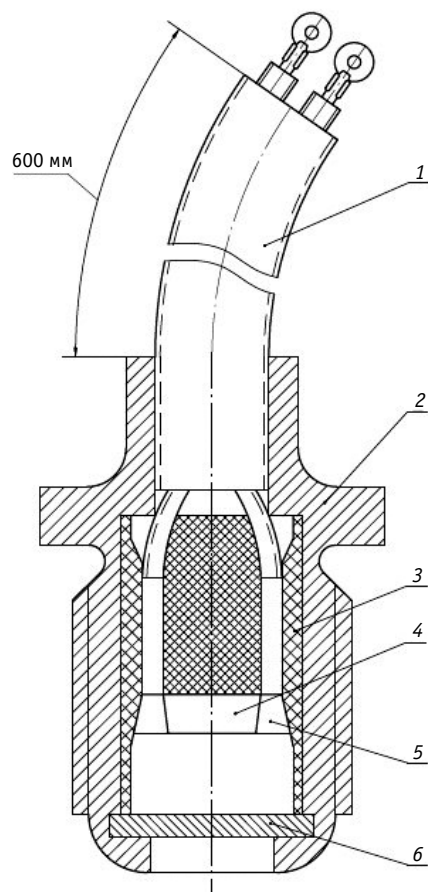


Рис. 1. Устройство термодатчика контроля нагрева букс

ваются замкнутыми. При нагреве корпуса до 96 ± 4 °С легкоплавкий сплав расплавляется и должен выливаться из канавки, разрывая контакт между концами проводов. Для герметизации полости датчика от возможного загрязнения на его корпусе путем завальцовки закрепляют латунную шайбу 6.

В табл. 1 приведен химический состав и содержание каждой составляющей легкоплавкого сплава [9].

В соответствии с ТУ [9] датчик должен обеспечивать следующие показатели надежности и срока службы:

безотказную наработку в течение $1,2 \cdot 10^4$ ч;

95 %-й ресурс в течение $7 \cdot 10^4$ ч.

Критерии отказа:

полная потеря проводимости токоведущими концами кабеля и повышение температуры замыкания электрической цепи свыше 125 °С;

срок службы термодатчиков 8 лет.

Таблица 1

Химический состав легкоплавкого сплава

Компонент	Содержание, %	ГОСТ
Висмут Ви1	52±0,5	10928–90
Свинец Со или С1	31,7±0,5	3778–77
Олово О1	15,3±0,5	860–75
Кадмий Кд1	1,0±0,1	1467–77

Работа системы СКНБ, основные неисправности термодатчика 393 и правила технического обслуживания подробно описаны в технической литературе [4–6].

В настоящее время на всех моделях тележек пассажирских вагонов отечественной постройки применяются термодатчики 393. Температура их срабатывания составляет 96 ± 4 °С [1]. Такие датчики должны устанавливаться на корпусе буксы только в вертикальном положении.

На буксах люлечной тележки модели 68-4065 (68-4066) термодатчик 393 вкручивается в верхнюю часть корпуса. Из-за конструктивных особенностей корпуса буксы безлюлечной тележки модели 68-4095 (68-4096) верхняя часть буксы служит опорой для пружины, и установить термодатчик 393 сверху невозможно, поэтому его размещают через специально изготовленный латунный переходник с торца буксы.

Наблюдения в эксплуатации показали недостаточную надежность СКНБ. Автоматизированные системы ПОНАБ-3, ДИСК-БВК-Ц и осмотровики ПТО неоднократно отмечали случаи обнаружения перегретых букс в безлюлечных тележках, однако термодатчики типа 393 не срабатывали. В связи с этим АО «ФПК» поставило перед производителями пассажирских вагонов задачу выяснить причины данного явления.

Для решения задачи была разработана программа и методика (ПМ), согласованная с АО «ФПК», ЦТА ОАО «РЖД» и ОАО «ТВЗ». Испытания проводились на стендовом оборудовании ЗАО НО «ТИВ», где имитировалось движение со скоростью 80 км/ч [10, 11].

Анализ работ [10, 11] по термодатчикам 393, установленным на буксах разных моделей тележек, позволил сделать следующие выводы.

1. Применение кронштейна (переходника) на корпусе буксы тележки модели 68-4095 (68-4096) при ее обдуве приводит к значительному снижению температуры в месте установки термодатчика 393 по сравнению с температурой буксы. В результате при движении вагона термодатчик 393 не срабатывает.

2. На тележке модели 68-4065 (68-4066) в отличие от тележки модели 68-4095 (68-4096) термодатчик 393 установлен в верхнюю часть корпуса буксы. В связи с этим его срабатывание зависит в том числе от погодных условий, скорости движения вагона и интенсивности нагрева подшипника.

3. Термодатчик 393 имеет завышенную уставку срабатывания и не обеспечивает предупреждение о перегреве подшипников буксы. По ТУ допуск срабатывания допускается до 125 °С.

4. В связи с использованием на инфраструктуре РЖД длиномерных рельсовых путей и, как следствие, снижением (практически исключением) тряски движущегося вагона (встряски буксы) термодатчики 393 практически не пригодны для применения в системе СКНБ для обеспечения безопасности движения пассажирских поездов.

На основе изложенных выводов ООО НПФ «КостаТест» разработало и утвердило в соответствии с установленным в ОАО «РЖД» порядком техническое задание на термодатчики повышенной надежности для СКНБ пассажирских вагонов (ДТБПН), конструктивные особенности которых заключаются в следующем:

датчик должен обеспечивать срабатывание СКНБ при достижении температуры буксы 75 ± 4 °С без встряхивания;

должна быть реализована возможность установки датчиков в буксовый узел как в вертикальном, так и в горизонтальном положении непосредственно в каждую буксу;

конструкция датчика должна обеспечивать снижение влияния внешних факторов на температуру срабатывания (обдуть при движении поезда со скоростями до 160 км/ч при низкой температуре в зимнее время).

Конструктивно и технологически предлагаемый датчик ДТБПН согласован со штатной системой контроля нагрева букс. Конструкция датчика позволяет крепить его в резьбовое отверстие буксы колесной пары. Важной особенностью предлагаемого датчика ДТБПН в отличие от используемого в настоящее время термодатчика 393 является срабатывание без встряхивания: датчик ДТБПН срабатывает при заданной температуре в спокойном состоянии без какого-либо механического воздействия.

Вторая особенность предлагаемого датчика ДТБПН — срабатывание в произвольном положении (как в вертикальном, так и в горизонтальном). Это может быть полезным для использования в вагонах производства после 2020 г.

ООО НПФ «КостаТест» разработало, изготовило и передало ЗАО НО «ТИВ» опытную партию ДТБПН для проведения предварительных и приемочных испытаний (общий вид датчиков ДТБПН показан на рис. 2 и 3).

Кроме того, была разработана и согласована (с АО «ФПК», ЦТА ОАО «РЖД» и др.) программа и методика предварительных и приемочных испытаний (ПМ).

В соответствии с ПМ опытная партия ДТБПН прошла полный комплекс стендовых испытаний, который включал в себя: проверку качества изготовления и сборки; проверку электробезопасности; проверку моделирования в реальных условиях эксплуатации с использованием корпуса буксы и полной цепи СКНБ; проверку устойчивости к климатическим воздействиям при исполнении ДТБПН по У1 согласно ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543; проверку устойчивости к механическим воздействующим факторам по группе М27 согласно ГОСТ Р 55821 и ГОСТ 17516.1.

Испытания проводились на базе испытательной лаборатории ЗАО НО «ТИВ» с использованием климатической камеры МХТВ-8, виброиспытательной системы ETS 1500/SA 15, тепловизора SAT модификации HotFind и других аттестованных средств измерений.

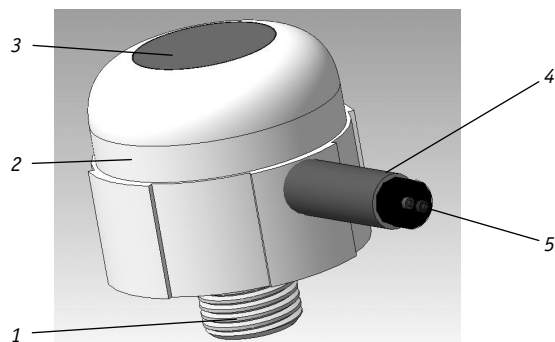


Рис. 2. ДТБПН для буксового узла с боковым выходом кабеля:

- 1 — наконечник с резьбой М16×1,5 для вкручивания в корпус буксового узла; 2 — теплоизолирующий корпус; 3 — наружный индивидуальный индикатор перегрева буксы; 4 — защитная оболочка кабеля; 5 — кабель

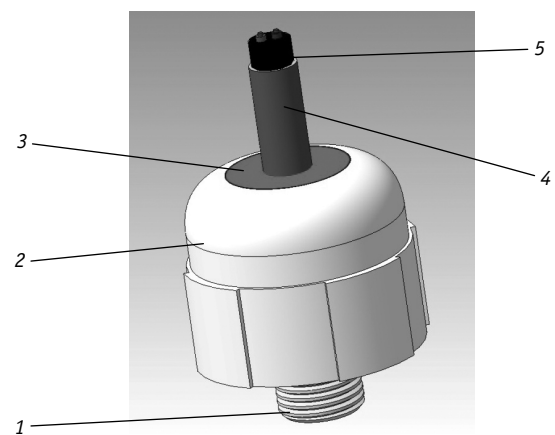


Рис. 3. ДТБПН для редуктора привода генератора:

- 1 — наконечник с резьбой М16×1,5 для вкручивания в корпус редуктора; 2 — теплоизолирующий корпус; 3 — наружный индивидуальный индикатор перегрева редуктора; 4 — защитная оболочка кабеля; 5 — кабель

По завершении каждого вида испытаний выполнялся внешний осмотр датчика, проверялись целостность электрической цепи, электрическая прочность изоляции и температура срабатывания. Было установлено, что для исследуемой партии датчиков температура срабатывания лежит в области $75 \pm 2,2$ °С.

Таким образом, предлагаемый датчик имеет повышенную точность и надежность контроля температуры буксы за счет выбора соответствующих технических решений и выполнения ряда мер при технологии его изготовления.

Датчик обеспечивает индивидуальную индикацию срабатывания, полную совместимость с используемой в настоящее время системой контроля нагрева букс, защиту от влияния внешних погодных факторов [12].

По итогам работы приемочной комиссии с учетом положительных результатов испытаний были утверждены КД и ТУ на датчик, который получил несколько измененное название и аббревиатуру ДТБР, определена установочная партия в 200 шт. для проведения подконтрольной эксплуатации.

В соответствии с ТУ [13] датчик ДТБР должен обеспечивать следующие показатели надежности и срока службы:

средняя наработка на отказ — $6 \cdot 10^4$ ч или 1,5 млн км пробега вагона;

назначенный срок службы не менее 12 лет с периодичностью проверки параметров один раз в 4 года.

Отказом датчика считается наличие хотя бы одного из признаков:

несрабатывание при температуре более 79 °С;

срабатывание при температуре менее 71 °С;

уменьшение сопротивления изоляции токоведущих цепей датчика относительно его корпуса до значения менее 10 МОм.

Температура срабатывания термодатчика ДТБР в соответствии с [13] составляет 75 ± 4 °С.

Подконтрольная эксплуатация термодатчиков ДТБР проводилась по программе и методике, согласованной с Департаментом управления бизнес-блоком «Пассажирские перевозки» ОАО «РЖД», АО «ФПК» и ЦТА ОАО «РЖД» [14].

В соответствии с программой и методикой в процессе подготовки и проведения эксплуатационных испытаний выполнялись следующие операции.

1. Проверка правильности подключения термодатчиков ДТБР в систему контроля нагрева букс. Термодатчики ДТБР легко устанавливаются на буксах тележек пассажирских вагонов взамен штатных термодатчиков 393.

2. Проверка электробезопасности, электрического сопротивления и прочности изоляции. Величина электрического сопротивления изоляции токоведущих цепей датчика относительно его корпуса, проверяемого мегаомметром с напряжением 500 В постоянного тока, должна быть не менее 10 МОм (использовали мегаомметр Е6–24). Проверка электрической прочности изоляции токоведущих цепей осуществляется в течение 1 мин напряжением 1500 В.

3. Проверка внутреннего сопротивления термодатчиков измеряется микроомметром Ф4104-М1. Сопротивление термодатчиков должно составлять не более 0,1 Ом.

4. Проверка работоспособности датчиков, установленных на подвижной состав и проходящих подконтрольную эксплуатацию.

Все вышеперечисленные операции выполняются ежедневно до завершения испытаний в объеме не менее 5% от партии термодатчиков, установленных на вагоны для проведения подконтрольной эксплуатации.

Подконтрольная эксплуатация пассажирских вагонов с новыми датчиками ДТБР проводилась с 20 февраля 2018 г. по 5 февраля 2019 г. на базе пассажирского вагонного депо Новосибирска. Сотрудниками депо и ООО «ТРК» при участии представителей АО «ФПК» было установлено 200 датчиков на вагоны поездов Новосибирск — Адлер, Новосибирск — Кулунда, Новосибирск — Новый Уренгой, Новосибирск — Томск.

За указанный период сработало четыре датчика ДТБР в пути следования:

два датчика 13.08.2018 г. на вагоне № 083-17497 (первая и четвертая колесные пары);

один датчик 18.08.2018 г. на вагоне № 084-11829 (первая колесная пара);

один датчик 18.08.2018 г. на вагоне № 084-14062 (вторая колесная пара).

Осмотр буксовых узлов колесных пар, на которых сработали датчики ДТБР, не выявил отклонений в их техническом состоянии, препятствующих дальнейшей эксплуатации.

Сотрудники депо объясняют срабатывание датчиков ДТБР аномально высокой температурой, которая наблюдалась в этот летний период, а следовательно, дополнительным прогревом буксы и недостаточно высоким для такого периода уровнем порога срабатывания чувствительного элемента датчиков (75 ± 4 °С).

По завершении эксплуатационных испытаний для проверки качества и работоспособности датчиков после годичной эксплуатации были проведены испытания в лабораторных условиях в соответствии с утвержденной программой и методикой [14]. Температура срабатывания термодатчиков ДТБР определялась на измерительных компьютеризированных стендах производства ООО НПФ «КостаТест».

Для этого на семи образцах, случайно выбранных и снятых с вагонов подвижного состава, курсирующих по маршруту Новосибирск — Кулунда, Новосибирск — Новый Уренгой, Новосибирск — Томск (084-14633, 083-17497, 084-14633), в соответствии с программой подконтрольной эксплуатации датчиков проведены следующие процедуры.

1. Внешний осмотр датчиков на буксовом узле и после снятия с него.
2. Измерение сопротивления чувствительных элементов каждого датчика в лабораторных условиях.
3. Определение температуры срабатывания, сопротивления чувствительных элементов и сопротивления изоляции каждого датчика в лабораторных условиях.
4. Определение температуры срабатывания датчика, установленного в металлическую поковку, имитирующую установку датчика в корпус буксового узла.

Внешний осмотр показал, что все датчики ДТБР не имеют механических дефектов и пригодны для дальнейшей работы.

В табл. 2 приведены значения сопротивления чувствительных элементов датчиков, измеренных на буксах,

Таблица 2

Значения сопротивлений чувствительных элементов, измеренных на буксовом узле

№ п/п	Партия и номер датчика	Сопротивление чувствительного элемента датчика, Ом
1	Партия 006, № 060	0,040
2	Партия 005, № 060	0,045
3	Партия 006, № 033	0,040
4	Партия 005, № 032	0,040
5	Партия 006, № 010	0,040
6	Партия 006, № 005	0,040
7	Партия 005, № 014	0,040

Таблица 3

Результаты испытаний датчиков ДТБР в лабораторных условиях

№ п/п	Партия и номер датчика	Температура срабатывания датчика, °С	Сопротивление чувствительного элемента датчика после срабатывания, ГОм	Сопротивление изоляции датчика, ГОм
1	Партия 006, № 060	77	Более 10	Более 10
2	Партия 005, № 060	77	Более 10	Более 10
3	Партия 006, № 033	79	Более 10	Более 10
4	Партия 005, № 032	79	Более 10	Более 10
5	Партия 006, № 010	74	Более 10	Более 10
6	Партия 006, № 005	79	Более 10	Более 10
7	Партия 005, № 014	78	Более 10	Более 10

а в табл. 3 — результаты испытаний ДТБР в лабораторных условиях на территории депо Новосибирск с использованием диагностического оборудования ООО НПФ «КостаТест».

Таким образом, было установлено, что после годичной эксплуатации датчики ДТБР сохраняют работоспособность и могут быть допущены к дальнейшей эксплуатации. Как ранее отмечалось, четыре датчика сработали в летний период эксплуатации, при этом осмотр буксовых узлов показал, что их техническое состояние не препятствует дальнейшей эксплуатации. На основе анализа результатов испытаний и с учетом того, что новый КТСМ-02 имеет пороговое значение по абсолютной температуре сигнализации на уровне 100 °С, для ДТБР рекомендовано повысить температуру срабатывания до 92 ± 4 °С. Предложение было одобрено на совещании в АО «ФПК» при рассмотрении итогов подконтрольной эксплуатации ДТБР.

По результатам подконтрольной эксплуатации термодатчиков ДТБР и с учетом рекомендаций эксплуатирующих организаций были проведены работы по совершенствованию его конструкции, включая повышение температуры срабатывания до 92 ± 4 °С, увеличение яркости индивидуальной индикации о срабатывании, упрощение установки в буксовый узел.

Датчик ДТБР может изготавливаться со светодиодным индивидуальным индикатором непрерывного (рис. 4а) или прерывистого (рис. 4б) излучения красного цвета: индикация наглядно указывает на буксу при перегреве.

Световод конструктивно выполнен в виде крышки, совмещенной герметичным соединением с теплозащитным кожухом (рис. 2–4). Внутри корпуса размещена электронная плата преобразования питающего постоянного напряжения в импульсное для генерации световых импульсов от двух светодиодов в случае перегрева буксы и срабатывания датчика как реле.

Работа датчиков ДТБР с пороговой температурой срабатывания 92 ± 4 °С изучена на опытной партии из 20 шт. на компьютеризированной установке с плавным изменением температуры.

Для измерения температуры испытуемых датчиков использовали платиновый чувствительный элемент Pt1000, встроенный в буксовый узел в место установки (вкручивания) термодатчика ДТБР. Буксовый узел нагревали внутри аналогично роликовым подшипникам. Ход изменения температуры датчика и ток в цепи регистрировали на ПК. Сопротивление датчика и его сопротивление изоляции измеряли на диагностическом стенде разработки ООО НПФ «КостаТест» с регистрацией показаний на флеш-носитель и в архив компьютеризированного стенда.

На рис. 5 показано изменение температуры в верхней части корпуса буксы на дне резьбового отверстия М16 с шагом 1,5 мм, в котором размещался термодатчик ДТБР. Для регистрации факта срабатывания датчика измеряли ток цепи, в которую он был включен (рис. 6).

Датчик срабатывает при достижении температуры 94,6 °С (разрыв цепи на рис. 6) в соответствии с его настройкой на 92 ± 4 °С.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный ООО НПФ «КостаТест» термодатчик ДТБР прошел полный цикл процедур постановки на производство. Проведенные испытания и экспериментальные исследования подтверждают его работоспособность, высокие эксплуатационные показатели и заявленные изготовителем характеристики: температура срабатывания (92 ± 4 °С), срабатывание без встряхивания и в произвольном положении (как в вертикальном, так и в горизонтальном), отсутствие влияния внешних факторов на температуру срабатывания (обдув при движении поезда со скоростями до 160 км/ч при низкой температуре в зимнее время).

2. Конструкция датчика и принцип его действия позволяют осуществлять непрерывный контроль температуры буксового узла колесной пары в составе СКНБ и индцинировать ее превышение относи-

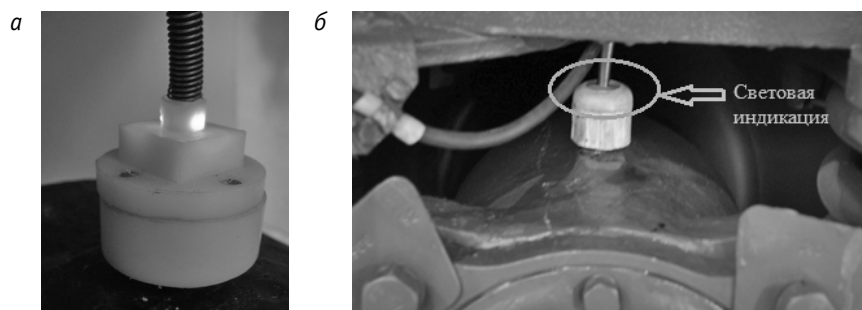


Рис. 4. Световая индивидуальная индикация датчика ДТБР на перегретой буксе непрерывного (а) и прерывистого (б) свечения

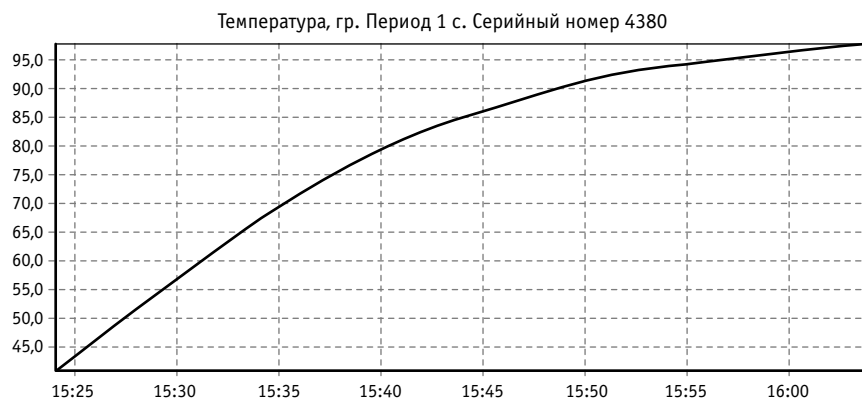


Рис. 5. Временная зависимость температуры датчика с пороговой температурой 92 ± 4 °С при изменении его температуры



Рис. 6. Временная зависимость тока в цепи датчика с пороговой температурой 92 ± 4 °С при изменении его температуры

тельно порогового значения на индивидуальном индикаторе для каждой буксы.

3. Термодатчик ДТБР имеет среднюю наработку на отказ значительно выше, чем термодатчик 393, а периодичность его проверки совпадает с периодичностью технического обслуживания и ремонта новых пассажирских вагонов, составляющей 12 лет.

4. Датчики конструктивно и технологически совместимы с используемой в настоящее время системой контроля нагрева букс пассажирского вагона.

5. Применение термодатчиков ДТБР в СКНБ вагонов эксплуатационного парка АО «ФПК» вместо термодатчиков 393 обеспечит повышение надежности и безопасности движения поездов.

Литература

1. Вагоны. Конструкция, теория, расчет / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский [и др.]. Москва : Транспорт, 1980. 440 с.
2. Миронов А. А. Научные и технические основы бесконтактного теплового контроля букс железнодорожного подвижного состава : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург, 2009. 44 с.
3. Тепловая диагностика подшипников кассетного типа пассажирских вагонов / А. А. Миронов, В. Л. Образцов, А. Е. Павлюков [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2007. № 10. С. 20–22. ISSN 0005–2329.
4. Электрооборудование пассажирских вагонов модели 61-425 (ЦМВО-66) / О. Ф. Никитин, В. Е. Новиков, А. В. Тальмин [и др.]. Москва : Транспорт, 1977. 144 с.
5. Майоров В. Н. Устройство и ремонт электрооборудования вагонов. Москва : Транспорт, 1980. 279 с.
6. Егоров В. П. Эксплуатация электрооборудования пассажирских вагонов. Москва : Транспорт, 1980. 296 с.
7. Миронов А. А., Зинкевич А. В., Павлюков А. Е. Исследование термонагруженности буксового узла с кассетным подшипником // Транспорт Урала. 2005. № 3 (6). С. 54–61. ISSN 1815–9400.
8. Миронов А. А. Создание отраслевой системы мониторинга безопасности железнодорожного подвижного состава в пути следования // Транспорт Урала. 2006. № 2 (9). С. 42–47. ISSN 1815–9400.
9. ТУ 24.05.158–88. Термодатчик 393. Технические условия. Москва : ПО «Трансмаш», 1988. 16 с.
10. Попов Е. Н., Волков В. Е., Самошкин О. С. Исследование распределения температуры по элементам буксового узла тележки моделей 68-4095 (68-4096) при перегреве подшипников // Проблемы безопасности на транспорте : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции. Гомель : БелГУТ, 2015. С. 61–62.
11. Попов Е. Н., Волков В. Е., Самошкин О. С. Исследование работоспособности термодатчиков системы контроля нагрева букс при перегреве подшипников // Тяжелое машиностроение. 2015. № 1–2. С. 47–50. ISSN 1024–7106.
12. Разработка и исследования датчиков повышенной надежности для контроля температуры букс / Е. Н. Попов, В. Е. Волков, Е. В. Козеев [и др.] // Проблемы и перспективы развития вагоностроения : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. Брянск, 2016. С. 107–110.
13. ТУ 6676-011-23631499-2016. Датчик контроля температуры нагрева буксы и редуктора ДТБР. Технические условия. Новосибирск : ООО НПФ «КостаТест», 2016. 22 с.
14. Программа и методика подконтрольной эксплуатации датчиков контроля температуры нагрева буксы и редуктора повышенной надежности ДТБР. Новосибирск : ООО НПФ «КостаТест», 2017. 8 с.

References

1. Wagons. Design, theory, calculation [Vagony. Konstruktsiya, teoriya, raschet] / L. A. Shadur, I. I. Chelnokov, L. N. Nikolskiy [et al.]. Moscow : Transport, 1980. 440 p.
2. Mironov A. A. Scientific and technical basics of contactless thermal control of railway rolling stock axle-boxes [Nauchnye i tekhnicheskie osnovy beskontaktnogo teplovogo kontrolya buks zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava] : Synopsis of DSc in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2009. 44 p.
3. Thermal diagnostics of casset type bearings for passenger cars [Teplovaya diagnostika podshpnikov kassetnogo tipa passazhirskikh vagonov] / A. A. Mironov, V. L. Obratsov, A. E. Pavlyukov [et al.] // Automation, communication and informatics. 2007. No. 10. Pp. 20–22. ISSN 0005-2329.
4. Electrical equipment of model 61-425 (TsMVO-66) passenger cars [Elektrooborudovanie passazhirskikh vagonov modeli 61-425 (TsMVO-66)] / O. F. Nikitin, V. E. Novikov, A. V. Talmin [et al.]. Moscow : Transport, 1977. 144 p.
5. Mayorov V. N. Design and repair of electrical equipment of cars [Ustroystvo i remont elektrooborudovaniya vagonov]. Moscow : Transport, 1980. 279 p.
6. Egorov V. P. Operation of electrical equipment of passenger cars [Eksploatatsiya elektrooborudovaniya passazhirskikh vagonov]. Moscow : Transport, 1980. 296 p.
7. Mironov A. A., Zinkevich A. V., Pavlyukov A. E. Study of thermal loading of casset type axle box [Issledovanie termonagruzhennosti buksovogo uzla s kassetnym podshpnikom] // Transport of the Urals. 2005. No. 3 (6). Pp. 54–61. ISSN 1815-9400.
8. Mironov A. A. Creation of industry-specific system for security monitoring of railway rolling stock in transit [Sozdanie otraslevoy sistemy monitoringa bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava v puti sledovaniya] // Transport of the Urals. 2006. No. 2 (9). Pp. 42–47. ISSN 1815-9400.
9. Technical Specification 24.05.158-88. 393 thermal sensor. Technical Specification [Termodatchik 393. Tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Transmash, 1988. 16 p.
10. Popov E. N., Volkov V. E., Samoshkin O. S. Study of temperature distribution on elements of axle box of model 68-4095 (68-4096) bogies at overheating of bearings [Issledovanie raspredeleniya temperatury po elementam buksovogo uzla telezhki modeley 68-4095 (68-4096) pri peregreve podshpnikov] // Security problems on transport : proceedings of the 7th International research and practice conference. Gomel : BSUT, 2015. Pp. 61–62.
11. Popov E. N., Volkov V. E., Samoshkin O. S. The study of thermal sensors' workability for alarm system of heating axle-boxes by overheating roller bearing [Issledovanie rabotosposobnosti termodatchikov sistemy kontrolya nagreva buks pri peregreve podshpnikov] // Heavy machinery. 2015. No. 1–2. Pp. 47–50. ISSN 1024-7106.
12. Development and study of increased reliability sensors for controlling temperature of axle boxes [Razrabotka i issledovaniya datchikov povyshennoy nadezhnosti dlya kontrolya temperatury buks] / E. N. Popov, V. E. Volkov, E. V. Kozeev [et al.] // Problems and prospects of car engineering : proceedings of the 7th All-Russian research and practice conference. Bryansk, 2016. Pp. 107–110.
13. Technical Specification 6676-011-23631499-2016. DTBR sensor for controlling temperature of an axle box and a gearbox. Technical Specification [Datchik kontrolya temperatury nagreva buksy i reduktora DTBR. Tekhnicheskie usloviya]. Novosibirsk : Scientific and Production Firm «KostaTest» LLC, 2016. 22 p.
14. Program and method of under-control operation of DTBR increased reliability sensors for controlling temperature of bearing and gearbox heating [Programma i metodika podkontrol'noy ekspluatatsii datchikov kontrolya temperatury nagreva buksy i reduktora povyshennoy nadezhnosti DTBR]. Novosibirsk : Scientific and Production Firm «KostaTest» LLC, 2017. 8 p.

Объем статьи 0,73 авторских листа

УДК 629.45

Владислав Андреевич Ханис, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»
Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Сергей Валерьевич Беспалько, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»
Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Игорь Алексеевич Ключиков, доктор технических наук, профессор кафедры физики и нанотехнологий
Курского государственного университета (КГУ), Курск, Россия,

Андрей Леонидович Ханис, кандидат военных наук, доцент кафедры информационной безопасности
Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ), Курск, Россия,

Анна Андреевна Ханис, студентка кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»
Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНОСТИ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Vladislav Andreevich Khanis, postgraduate student, Railway Cars and Carriage Facilities Department,
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Sergey Valeryevich Bespalko, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars and Carriage Facilities Department,
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Igor Alexeevich Klyuchikov, DSc in Engineering, Professor, Physics and Nanotechnology Department,
Kursk State University (KSU), Kursk, Russia,

Andrey Leonidovich Khanis, PhD in Military, Associate Professor, Information Security Department,
Southwest State University (SWSU), Kursk, Russia,

Anna Andreevna Khanis, student, Automation, Telemechanics and Communications on the Railway Department,
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Model for detecting and evaluating the fire hazard of spark discharges in the electrical networks of passenger cars based on the use of fiber-optic sensors

Аннотация

В статье обоснован подход к оценке пожароопасности искровых разрядов в элементах электрооборудования пассажирских вагонов подвижного состава на основе обнаружения оптических вспышек с помощью волоконно-оптических датчиков. Представленная модель позволяет реализовать возможность обнаружения и оценки оптических вспышек слабых искровых разрядов на потенциально пожароопасных электрических контактах в электрических сетях пассажирских вагонов. Для решения данной задачи предлагается размещение датчиков электрических разрядов с использованием оптических волокон для доставки к ним излучения оптических вспышек искровых разрядов из пожароопасных пространственно удаленных элементов электрической сети.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, искровой разряд, оптическая вспышка, дуговой разряд, фотоприемник, пороговая обработка, интегратор, пассажирский вагон.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-46-51

Summary

The paper substantiates an approach to assessing the fire hazard of spark discharges in the electrical equipment elements of passenger cars of rolling stock based on the detection of optical flashes using fiber-optic sensors. The presented numerical model makes it possible to realize the possibility of detecting and evaluating optical flashes of weak spark discharges on potentially fire-hazardous electrical contacts in the electrical networks of passenger cars. To solve this problem, it seems appropriate to place sensors of electrical discharges using optical fibers to deliver to them the radiation of optical flashes of spark discharges from fire-hazardous spatially remote elements of the electrical network.

Keywords: fiber-optic sensor, spark discharge, optical flash, arc discharge, photodetector, threshold processing, integrator, passenger car.



Значительная часть пожаров, возникающих в пассажирских вагонах, вызвана различного рода неисправностями электрических сетей [1–6]. Такие неисправности могут приводить к электрическому пробоя изоляции или воздушных промежутков между элементами цепи, находящимися под напряжением, и возгоранию прилегающих материалов и сред. Электрический пробой характеризуется внезапным образованием сильно ионизированного канала с низким сопротивлением, которое может в процессе пробоя уменьшиться до величины, соответствующей короткому замыканию [7]. Особенно опасно развитие после пробоя мощных дуговых разрядов, с большой вероятностью вызывающих пожары и повреждения электрооборудования. В связи с этим в работах, исследующих пожароопасность в электрических сетях, много внимания уделяется обнаружению дуговых разрядов и защите от них [8–10]. Однако гораздо менее мощные искровые разряды, не приводящие непосредственно к короткому замыканию, также создают опасность пожаров, особенно при наличии в воздухе горючих смесей — при попадании в него паров или мелкодисперсных частиц горючих веществ. Причины образования таких воздушных горючих смесей весьма разнообразны и определяются условиями эксплуатации вагонов, а также нарушением правил пожаробезопасности со стороны персонала и пассажиров [6, 11, 12].

Данная статья посвящена обнаружению и оценке пожароопасности маломощных искровых разрядов в электрических сетях пассажирских вагонов с помощью волоконно-оптических датчиков. Устройства такого типа широко используются по отношению к оптическим вспышкам дуговых разрядов [11–18], для которых, в отличие от искровых разрядов, нет проблемы обнаружения на фоне паразитной засветки от искусственного или естественного освещения.

Способность электрической искры к зажиганию горючих смесей (инициированию самоподдерживающейся реакции горения), согласно наиболее распространенной тепловой модели, зависит от общего количества выделенного при разряде тепла q [15–18], значение которого определяется выражением

$$q = \int_0^{\tau_p} i^2(t)R(t)dt, \quad (1)$$

где τ_p — длительность разряда, с;

$i(t)$ — ток во время разряда, А;

$R(t)$ — сопротивление канала во время разряда, Ом.

Температура внутри искрового канала может достигать очень высоких значений (нескольких десятков тысяч градусов), однако из-за малой длительности искры (единицы-десятки мкс) зажигание горючих смесей зависит от степени разогрева канала в момент разряда и от динамики последующего рассеивания тепла из разогретой области. Для зажигания необходимо, чтобы в течение характерного времени τ_T температура в области искрового канала $T(t)$ превышала некоторую минимальную температуру горения T_T [13–18]. Типичные значения характерного времени составляют $\tau_T = 100–1000$ мкс, что намного больше типичной длительности искрового разряда $\tau_p = 1–10$ мкс. Поэтому зажигающая способность искры слабо обусловлена зависимостями тока $i(t)$ и сопротивления $R(t)$ в процес-

се разряда, а определяется при прочих равных условиях общим количеством выделенного при разряде тепла q . Если оно недостаточно велико, то за время τ_T разогретая разрядом область успевает охладиться до температуры ниже T_T , и горение не возникает. Соответственно существует некоторая минимальная величина выделенной при искровом разряде тепловой энергии — энергии зажигания q_{\min} , при превышении которой смесь загорается. В обычных условиях для большинства углеводородно-воздушных смесей $q_{\min} = 0,2–0,4$ мДж, для аэродисперсных систем $q_{\min} = 5–20$ мДж [F02–05].

Кроме опасности зажигания, постоянное или систематическое искрение в области контактирующих поверхностей вызывает изменение их электрических свойств. Это в конечном счете может стать причиной нарушения работы элементов электрических сетей и привести, в частности, к возрастанию контактных сопротивлений, а следовательно, к недопустимо высокому повышению температуры вблизи контактов и прогрессирующему со временем разрушению изоляции.

Таким образом, степень пожароопасности искровых разрядов в каком-либо элементе электрооборудования следует оценивать по величине тепловыделения q единичного разряда и суммарному тепловыделению Q многократных разрядов за определенный интервал времени (например, за время эксплуатации или между профилактиками). Значение q характеризует зажигающую способность однократной искры, а значение Q — степень накапливающихся в процессе эксплуатации повреждений контактирующих поверхностей искровыми разрядами.

Определение тепловыделения искровых разрядов на основе выражения (1) затруднительно из-за сложности регистрации электрических характеристик искры $i(t)$, $R(t)$. В связи с этим представляется перспективным использование оптических датчиков, регистрирующих энергию световой вспышки искровых разрядов. Будем предполагать, что известна (например, найдена путем калибровки) функциональная связь между тепловыделением искрового разряда и энергией сопутствующей ему световой вспышки, которая в простейшем случае имеет линейный вид. Тогда искровые разряды, способные вызвать возгорание, характеризуются энергией оптической вспышки

$$e \geq e_{\min} = \zeta q_{\min}, \quad (2)$$

где ζ — коэффициент связи, найденный при калибровке.

Световая вспышка описывается зависимостью от времени светового потока $I(t)$, зарегистрировав который можно найти энергию вспышки

$$e = \int_0^{\tau_p} I(t)dt \quad (3)$$

и оценить зажигающую способность разряда.

Фотоприемник оптического датчика представим как линейный элемент, преобразующий в электрический сигнал падающий на него световой поток $I(t) \geq 0$ вспышки искры, принимаемый на фоне аддитивных внешних оптических помех $n(t) \geq 0$ в виде паразитной засветки от искусственного или естественного освещения. Световые потоки, обусловленные вспышкой

и помехой, являются случайными функциями времени. Из-за отсутствия статистических данных, необходимых для оптимизации алгоритмов обнаружения всплесков и оценки их энергии, целесообразно ограничиться инженерным подходом, который состоит в рациональном выборе алгоритма обработки выходных сигналов фотоприемника [15–20].

Будем считать, что известны $\tau_{P_{max}}$ — максимальная длительность оптических всплесков разрядов и τ_{Π} — характерное время изменения помехи, причем $\tau_{\Pi} \gg \tau_{P_{max}}$. Используем два канала интегрирования выходного сигнала фотоприемника с временами интегрирования τ_1 и τ_2 , выбранными из условий

$$\begin{cases} \tau_1 = \tau_{P_{max}} \\ \tau_1 \ll \tau_2 \ll \tau_{\Pi} \end{cases} \quad (4)$$

Выходные сигналы 1-го и 2-го каналов определяются выражениями:

$$s_{\tau_1}(t) = \int_{t-0,5\tau_1}^{t+0,5\tau_1} [I(t') + n(t')] dt'; \quad (5)$$

$$s_{\tau_2}(t) = \int_{t-0,5\tau_2}^{t+0,5\tau_2} [I(t') + n(t')] dt'. \quad (6)$$

Их разность, взятая в виде

$$s(t) = s_{\tau_1}(t) - \frac{\tau_1}{\tau_2} s_{\tau_2}(t), \quad (7)$$

для квазистационарной помехи может быть представлена как

$$s(t) = S_I(t) + S_{\Pi}(t), \quad (8)$$

где

$$S_I(t) = \int_{t-0,5\tau_1}^{t+0,5\tau_1} I(t') dt' - \frac{\tau_1}{\tau_2} \int_{t-0,5\tau_2}^{t+0,5\tau_2} I(t') dt'; \quad (9)$$

$$S_{\Pi}(t) = \int_{t-0,5\tau_1}^{t+0,5\tau_1} n(t') dt' - \frac{\tau_1}{\tau_2} \int_{t-0,5\tau_2}^{t+0,5\tau_2} n(t') dt'. \quad (10)$$

Сигнальная составляющая $s_I(t)$ с учетом выражения (3) и условий (4) достигает максимально значения

$$s_{I_{max}} = e - \frac{\tau_1}{\tau_2} e \approx e, \quad (11)$$

а помеховая составляющая $s_{\Pi}(t)$ значительно уменьшается и равна нулю при изменении помехи $n(t)$ по линейному закону.

Таким образом, для обнаружения оптической вспышки разряда и оценки ее энергии на фоне квазистационарной помехи можно использовать пороговую обработку выходного сигнала 1-го интегратора $s_{\tau_1}(t)$ со следящим порогом, формируемым на основе выходного сигнала 2-го интегратора $s_{\tau_2}(t)$ [21]:

$$\Pi(t) = s_{\tau_2}(t) + \delta, \quad (12)$$

где δ — постоянная составляющая следящего порога, выбираемая исходя из заданной вероятности ложных обнаружений оптических всплесков.

Энергия оптической вспышки, требуемая для оценки зажигательной способности разряда, определяется как максимум сигнала (7) при обнаружении вспышки. Разряды, обладающие зажигательной способностью, характеризуются энергией $e \geq e_{min}$. Накапливающиеся из-за разрядов повреждения характеризуются суммарной энергией всех обнаруженных всплесков $E = \sum_i e_i$ (здесь i — порядковый номер вспышки).

Работоспособность рассмотренных алгоритмов обнаружения и оценки по-

жароопасности искровых разрядов проверена на имитационной модели в среде Matlab [22]. Временной интервал моделирования составлял 50 мс. Моменты времени оптических всплесков разрядов были случайными с равномерным распределением на интервале моделирования, длительность вспышки — случайная с равномерным распределением на интервале 10–100 мкс. Помеха имитировалась в виде осцилляций частотой 100 Гц, обусловленных искусственным освещением, с наложением полосового белого шума, обусловленного собственным шумом фотоприемника. Времена интегрирования составляли $\tau_1 = 0,1$ мс и $\tau_2 = 1$ мс, постоянная составляющая следящего порога $\delta = 0,06$. Результаты моделирования, подтверждающие работоспособность рассмотренных алгоритмов обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов, представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 показана смесь сигнала и помехи на выходе 1-го интегратора, а также порог обнаружения, формируемый на основе выходного сигнала 2-го интегратора. На рис. 2 показан конечный результат обработки, где импульсы соответствуют обнаруженным оптическим вспышкам разряда. По значениям максимумов импульсов производится обнаружение пожароопасных разрядов $e \geq e_{min}$.

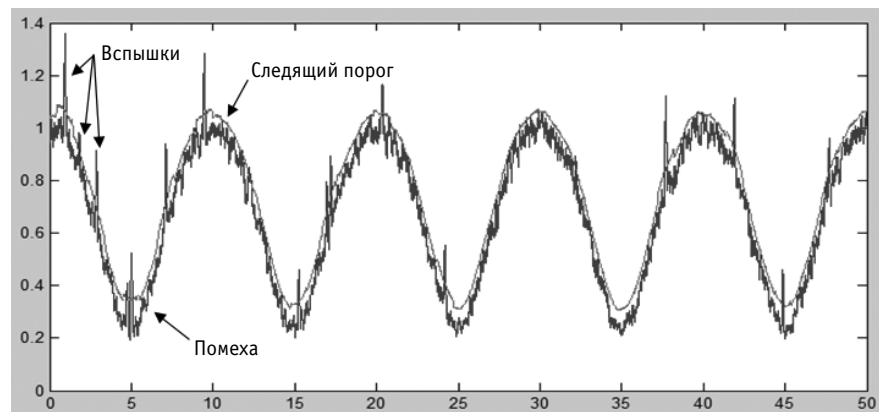


Рис. 1. Вид сигнала на выходе интегратора



Рис. 2. Вид сигнала после обработки

Структурная схема волоконно-оптического датчика представлена на рис. 3 [22–24].

Интеграторы I_1 и I_2 выполняют преобразования (9), (10). Пороговое устройство Π пропускает импульсы, превышающие порог (11). Устройство сравнения C формирует на выходе 1 значения энергии всплесков $e \geq e_{\min}$, способных вызвать возгорание. Сумматор Σ формирует на выходе 2 текущее значение суммарной энергии всех обнаруженных всплесков $E = \sum_i e_i$. Далее значения e_i , E должны обрабатываться устройством принятия решений [25, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время для раннего обнаружения возгораний в электрических сетях и электрооборудовании активно применяются оптические устройства. Принцип работы данных устройств основан на регистрации оптического излучения вспышки электрической дуги и формировании команды на своевременное отключение поврежденного участка сети. Для обнаружения в электрических сетях пассажирских вагонов оптических всплесков искровых разрядов на фоне помех предлагается использовать метод преобразования светового потока вспышки искры в элек-

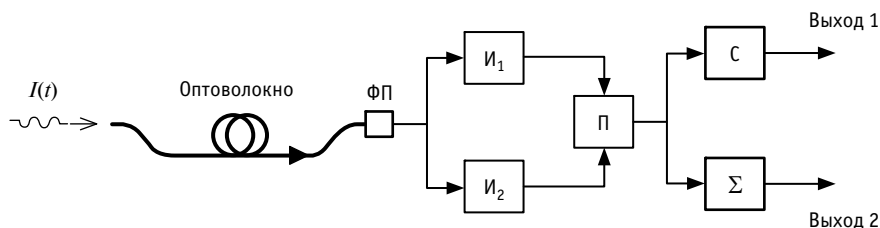


Рис. 3. Структурная схема волоконно-оптического датчика:
ФП — фотоприемник; I_1 , I_2 — интеграторы; Π — пороговое устройство; C — устройство сравнения; Σ — сумматор

трический сигнал с последующей пороговой обработкой сигнала со следящим порогом. Для реализации данного метода предлагается оптическое устройство, в состав которого включены фотоприемник, интеграторы, пороговое устройство, устройство сравнения и сумматор. Для обнаружения оптической вспышки разряда на фоне помехи используется двухканальная схема следящего интегрирования выходного сигнала фотоприемника, пропорционального падающему световому потоку. Для проверки работоспособности предложенного устройства разработаны модели обнаружения сигналов искровых разрядов, проведено моделирование разработанных алгоритмов и получены результаты, подтверждающие их работоспособность.

Электрические сети пассажирских вагонов характеризуются достаточной протяженностью. Поэтому представляется целесообразным централизованное размещение датчиков электрических разрядов с использованием оптических волокон для доставки к ним излучения оптических всплесков разрядов из пожароопасных пространственно удаленных элементов электрической сети. Предложенный вариант оптического устройства рекомендуется применять совместно с оптическим волокном в электрических сетях и электрооборудовании пассажирских вагонов для решения задач раннего прогнозирования возникновения аварийных ситуаций и сведения к минимуму причинения ущерба [26–29].

Литература

1. Отчет о статистике пожаров в ОАО «РЖД» / ОАО «РЖД». Москва, 2009.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2017 году : статистический сборник / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. Москва : ВНИИПО, 2018. 125 с.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году : статистический сборник / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. Москва : ВНИИПО, 2020. 80 с.
4. Пожар в вагоне пассажирского поезда. URL: <https://www.rzn.info/news/2020/4/8/v-mchs-prokomentirovali-pozhar-v-vagonu-passazhirs-kogo-poezda.html> (дата обращения: 08.04.2020).
5. Сметанина М. И., Власова О. С. Состояние пожарной безопасности на железнодорожном транспорте в Российской Федерации // Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования : электронный сборник статей по материалам LII международной студенческой научно-практической конференции. 2018. № 17 (52). С. 85–89. ISSN 2542–0011.
6. Оценка возможностей современных технических средств оповещения о пожарах в помещениях пассажирских вагонов подвижного состава / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис, А. А. Ханис // Транспортные системы: безопасность, новые

References

1. Statement on fire statistics in the JSC Russian Railways [Отчет о статистике пожаров в ОАО «РЖД»] / JSC Russian Railways. Moscow, 2009.
2. Fires and fire safety in 2017 [Пожары и пожарная безопасность в 2017 году] : statistical book / Ed. by D. M. Gordienko. Moscow : All-Russian Research Institute for Fire Protection, 2018. 125 p.
3. Fires and fire safety in 2019 [Пожары и пожарная безопасность в 2019 году] : statistical book / Ed. by D. M. Gordienko. Moscow : All-Russian Research Institute for Fire Protection, 2020. 80 P.
4. Fire in a car of a passenger train [Пожар в вагоне пассажирского поезда]. URL: <https://www.rzn.info/news/2020/4/8/v-mchs-prokomentirovali-pozhar-v-vagonu-passazhirs-kogo-poezda.html> (access date: 08.04.2020).
5. Smetanina M. I., Vlasova O. S. Condition of fire safety on railway transport in the Russian Federation [Sostoyaniye pozharnoy bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte v Rossiyskoy Federatsii] // Scientific community of students: Interdisciplinary research : proceedings of the LII international research and practice conference of students. 2018. No. 17 (52). Pp. 85–89. ISSN 2542–0011.
6. Assessment of possibilities of modern technical facilities for fire warning in salons of passenger cars [Otsenka vozmozhnostey sovremennykh tekhnicheskikh sredstv opoveshheniya o pozharakh v pomeshheniyakh passazhirs-kikh vagonov podvizhnogo sostava] / V. A. Khanis, S. V. Bepalko, A. L. Khanis, A. A. Khanis // Transport systems: safety, new technologies, ecology : proceedings of the 2nd International research and practice conference. Yakutsk, 2020. Pp. 177–181.

технологии, экология : сборник трудов II международной научно-практической конференции. Якутск, 2020. С. 177–181.

7. Электрическая прочность воздушных промежутков. URL: <https://websor.ru/osnovy/elektrotehnicheskie-materialy/elproch/> (дата обращения: 08.04.2020).
8. Коронный, искровой и высокочастотные разряды. URL: https://websor.ru/osnovy/elektricheskie-processy-v-vakuume-i-gazah/koronnej_iskrovoi_razryadje/ (дата обращения: 08.04.2020).
9. Виды электрического разряда в газах. URL: https://websor.ru/osnovy/elektricheskie-processy-v-vakuume-i-gazah/videj_elektricheskogo_razryada/ (дата обращения: 08.04.2020).
10. Ширковец А. И., Губаев Д. Ф. Математическая модель горения однофазной дуги в изоляции силовых кабелей с графической интерпретацией развития пробоя на основе нелинейного сопротивления дугового канала // Проблемы энергетики. 2012. № 9–10. С. 121–134. ISSN 1998–9903.
11. Методика оценки вероятности возникновения пожаров на основе мониторинга пожароопасных состояний электрооборудования пассажирских вагонов / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис, А. А. Ханис // Транспорт Урала. 2020. № 1 (64). С. 54–56. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-54-56. ISSN 1815–9400.
12. Модели диагностики пожароопасных состояний сетей электропитания пассажирского вагона / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. А. Ханис, А. Л. Ханис // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых : сборник научных статей 9-й Международной молодежной научной конференции. Т. 4. Курск : ЮЗГУ, 2020.
13. Дубовенко К. В. Численное моделирование характеристик искрового разряда в жидком азоте // Электротехника и Электромеханика. 2014. № 3. С. 63–68. ISSN 2074–272X.
14. Васильев А. Г. Численная модель для расчета температурного профиля нестационарного дугового разряда в воздухе при атмосферном давлении // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–1. С. 757. eISSN 2070–7428.
15. Важов В. Ф., Лавринович В. А. Техника высоких напряжений: учебник. Томск : Изд-во ТПУ, 2014. 263 с.
16. Беленков А., Швечиков И., Елисеев А. Оптические системы обнаружения электрической дуги в комплектных распределительных устройствах // Компоненты и технологии. 2016. № 3 (176). С. 16–20. ISSN 2079–6811.
17. Совмещенный датчик электрической дуги / Ю. П. Казачков : патент 2419941 Российская Федерация. № 2010123334/07; заявл. 08.06.10; опубл. 27.05.11, Бюл. № 15.
18. Копейкина Т. В. Применение оптических датчиков для систем дуговой защиты комплектных распределительных систем // Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов. 2020. № 4.
19. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва : Наука, 1969. 576 с.
20. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: приложение к Приказу МЧС России от 10.07.2009 г. № 404.
21. Сколник М. Справочник по радиолокации. Москва : Техносфера. 2014.
22. Фролов С. Н. Метод, модель и алгоритмы анализа и оценки рисков возникновения пожароопасных ситуаций в электросетях на основе многоагентного подхода : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Курск, 2014.
7. Electrical strength of air gaps [Elektricheskaya prochnost' vozdushnykh promezutkov]. URL: <https://websor.ru/osnovy/elektrotehnicheskie-materialy/elproch/> (access date: 08.04.2020).
8. Corona, spark and high-frequency discharges [Koronnyy, iskrovoy i vysokochastotnye razryady]. URL: https://websor.ru/osnovy/elektricheskie-processy-v-vakuume-i-gazah/koronnej_iskrovoi_razryadje/ (access date: 08.04.2020).
9. Types of electrical discharge in gases [Vidy elektricheskogo razryada v gazakh]. URL: https://websor.ru/osnovy/elektricheskie-processy-v-vakuume-i-gazah/videj_elektricheskogo_razryada/ (access date: 08.04.2020).
10. Shirkovets A. I., Gubaev D. F. Mathematical model of arcing in power cable insulation with graphical interpretation of breakdown development based on nonlinear resistance of arc channel [Matematicheskaya model' gorenija odnofaznoy dugi v izolyatsii silovykh kabeley s graficheskoy interpretatsiyey razvitiya proboya na osnove nelineynogo soprotivleniya dugovogo kanala] // Power engineering: research, equipment, technology. 2012. No. 9–10. Pp. 121–134. ISSN 1998–9903.
11. Method for assessing fire risk on the basis of monitoring of fire-hazardous conditions of passenger cars electric equipment [Metodika otsenki veroyatnosti vozniknoveniya pozharov na osnove monitoringa požaroopasnykh sostoyaniy elektrooborudovaniya passazhirskikh vagonov] / V. A. Khanis, S. V. Bepalko, A. L. Khanis, A. A. Khanis // Transport of the Urals. 2020. No. 1 (64). Pp. 54–56. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-54-56. ISSN 1815–9400.
12. Models for diagnosing fire-hazardous states of power supply networks of a passenger car [Modeli diagnostiki požaroopasnykh sostoyaniy setey elektrosnabzheniya passazhirskogo vagona] / V. A. Khanis, S. V. Bepalko, A. A. Khanis, A. L. Khanis // Generation of the future: View of young scientists : proceedings of the 9th International youth scientific conference. Vol. 4. Kursk : SWSU, 2020.
13. Dubovenko K. V. Numerical simulation of spark discharge characteristics in liquid nitrogen [Chislennoe modelirovanie kharakteristik iskrovogo razryada v zhidkom azote] // Electrical Engineering & Electromechanics. 2014. No. 3. Pp. 63–68. ISSN 2074–272X.
14. Vasilyev A. G. Numerical model of the radial temperature distribution of nonstationary arc discharge in open air [Chislennaya model' dlya rascheta temperaturnogo profilya nestatsionarnogo dugovogo razryada v vozdukh pri atmosfernom davlenii] // Modern problems of science and education. 2015. No. 2–1. Pp. 757. eISSN 2070–7428.
15. Vazhov V. F., Lavrinovich V. A. High-voltage equipment [Tekhnika vysokikh napryazheniy] : textbook. Tomsk : Publishing House of TPU, 2014. 263 p.
16. Belenkov A., Shvchikov I., Eliseev A. Optical systems for detecting electrical ark in complete distribution devices [Opticheskie sistemy obnuzheniya elektricheskoy dugi v komplektnykh raspredelitel'nykh ustroystvakh] // Components and technologies. 2016. No. 3 (176). Pp. 16–20. ISSN 2079–6811.
17. Combined sensor of electrical ark [Sovmeshhennyy datchik elektricheskoy dugi] / Yu. P. Kazachkov : patent 2419941 Russian Federation. No. 2010123334/07; filed 08.06.10; publ. 27.05.11, Bulletin No. 15.
18. Kopeykina T. V. Application of optical sensors for systems of ark protection of complete distribution systems [Primenenie opticheskikh datchikov dlya sistem dugovoy zashhity komplektnykh raspredelitel'nykh sistem] // Modern methods of technical diagnostics and nondestructive inspection of parts and assemblies. 2020. No. 4.
19. Venttsel E. S. Probability theory [Teoriya veroyatnostey]. Moscow : Science, 1969. 576 p.
20. Method of determining calculated values of fire risk on industrial objects: annex to the Order of the EMERCOM of Russia dated 10.07.2009 No. 404 [Metodika opredeleniya raschetnykh velichin požarnogo riska na proizvodstvennykh ob'ektakh: prilozhenie k Prikazu MChS Rossii ot 10.07.2009 g. № 404].
21. Skolnik M. Handbook on radiolocation [Spravochnik po radiolokatsii]. Moscow : Technosphere. 2014.
22. Frolov S. N. Method, model and algorithms of analysis and assessment of fire risks in electrical network on the basis of multi-agent approach [Metod, model' i algoritmy analiza i otsenki riskov vozniknoveniya požaroopasnykh situatsiy v elektrosyetyakh na osnove mnogoagentnogo podkhoda] : PhD in Engineering Thesis. Kursk, 2014.

23. Датчик обнаружения электрической дуги на основе пластикового оптического волокна. URL: http://infiber.ru/biblioteka/stati/ArcFlash_Detective.html (дата обращения: 08.04.2020).
24. Защита от электрической дуги: безопасные и эффективные методы тепловизионного контроля. URL: <https://test-energy.ru/zashchita-ot-ehlektricheskoy-dugi-bezopasnye-i-ehf-fektivnye-metody-teplovizionnogo-kontrolya/> (дата обращения: 08.04.2020).
25. Диагностика и раннее предупреждение пожароопасных состояний в вагонах пассажирского подвижного состава / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис, А. А. Ханис // Образование — Наука — Производство : сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции. Чита, 2020. С. 67–73.
26. Устройство диагностики и мониторинга состояния пожароопасности электрических сетей энергоснабжения объектов / А. А. Бурмака, С. Г. Емельянов, О. И. Атакищев [и др.] : патент 126876 Российская Федерация. № 2011147572/07; заявл. 24.11.11; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10.
27. Волоконно-оптические датчики дуговой защиты на основе полимерных оптических волокон. URL: <http://www.pofcentre.ru/production/transducer> (дата обращения: 08.04.2020).
28. Метод и алгоритм анализа и прогнозирования пожаробезопасности при применении модульной структуры автоматизированной защиты помещений центров обработки данных / В. В. Серебровский, Н. А. Ханис, Е. В. Журавлева, А. Л. Ханис // Известия ЮЗГУ. 2015. № 2 (15). С. 47–54. ISSN 2223–1552.
29. Серебровский В. В., Ханис Н. А., Ханис А. Л. Метод анализа пожаробезопасности при применении модульной структуры автоматизированной защиты помещений центров обработки данных // Известия ЮЗГУ. 2015. № 1 (14). С. 8–14. ISSN 2223–1552.
23. Sensor for detecting electrical ark on the basis of plastic optical fibre [Datchik obnaruzheniya elektricheskoy dugi na osnove plastikovogo opticheskogo volokna]. URL: http://infiber.ru/biblioteka/stati/ArcFlash_Detective.html (access date: 08.04.2020).
24. Protection from electrical ark: safe and efficient methods of heat monitoring [Zashhita ot elektricheskoy dugi: bezopasnye i effektivnye metody teplovizionnogo kontrolya]. URL: <https://test-energy.ru/zashchita-ot-ehlektricheskoy-dugi-bezopasnye-i-ehf-fektivnye-metody-teplovizionnogo-kontrolya/> (access date: 08.04.2020).
25. Diagnostics and early prevention of fire-hazardous conditions in passenger cars [Diagnostika i rannee preduprezhdenie pozharoопасnykh sostoyaniy v vagonakh passazhirskogo podvizhnogo sostava] / V. A. Khanis, S. V. Bepalko, A. L. Khanis, A. A. Khanis // Education — Science — Production : proceedings of the 4th All-Russian research and practice conference. Chita, 2020. Pp. 67–73.
26. Device for diagnostics and monitoring of fire-hazardous condition of power supply network [Ustroystvo diagnostiki i monitoringa sostoyaniya pozharoопасnosti elektricheskikh setey energosnabzheniya ob'ektov] / A. A. Burmaka, S. G. Emelyanov, O. I. Atakishhev [et al.] : patent 126876 Russian Federation. No. 2011147572/07; filed 24.11.11; publ. 10.04.13, Bulletin No. 10.
27. Fibre-optic sensors of ark protection on the basis of polymer optic fibre [Volonno-opticheskie datchiki dugovoy zashhity na osnove polimernykh opticheskikh volokon]. URL: <http://www.pofcentre.ru/production/transducer> (access date: 08.04.2020).
28. Method and analysis algorithm and prediction of the fire safety in case of application of modular structure of automated protection of locations of data processing centers [Metod i algoritm analiza i prognozirovaniya pozharobezopasnosti pri primeneni modular'noy struktury avtomatizirovannoy zashhity pomeshheniy tse ntrov obrabotki dannykh] / V. V. Serebrovskiy, N. A. Khanis, E. V. Zhuravleva, A. L. Khanis // Journal Proceedings of the Southwest State University. 2015. No. 2 (15). Pp. 47–54. ISSN 2223–1552.
29. Serebrovskiy V. V., Khanis N. A., Khanis A. L. Method of the analysis of fire safety at application of modular structure, the automated protection of rooms of data-processing centers [Metod analiza pozharobezopasnosti pri primeneni modular'noy struktury avtomatizirovannoy zashhity pomeshheniy tse ntrov obrabotki dannykh] // Journal Proceedings of the Southwest State University. 2015. No. 1 (14). Pp. 8–14. ISSN 2223–1552.

Объем статьи 0,77 авторских листа

УДК 621.332.23

Максим Викторович Башаркин, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,
Алевтина Геннадьевна Исайчева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия

ОСОБЕННОСТИ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЯГОВОЙ РЕЛЬСОВОЙ СЕТИ ПРИ ТЯЖЕЛОВЕСНОМ ДВИЖЕНИИ

Maxim Viktorovich Basharkin, postgraduate student, Automation, Telemechanics and Communication on Railway Transport Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,
Alevtina Gennadyevna Isaycheva, PhD in Engineering, Associate Professor, Automation, Telemechanics and Communication on Railway Transport Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia

Features of current distribution in the traction rail network for heavy-haul traffic

Аннотация

В статье представлено исследование пределов изменения величины сопротивления элементов тяговой рельсовой сети под влиянием динамических нагрузок, возникающих при движении поездов повышенной массы и длины. Приведена дополненная электрическая схема замещения сборного токопроводящего рельсового стыка с учетом дублирующего стыкового соединителя. Определены пути протекания тягового тока при одновременном пропуске тяжеловесных поездов по смежным путям, соединенным междупутными перемычками. Сделаны выводы о необходимости непрерывного контроля за состоянием элементов тяговой рельсовой сети, качественное проведение которого можно обеспечить только за счет внедрения специальных автоматизированных систем.

Ключевые слова: тяговая рельсовая сеть, канализация тягового тока, асимметрия тягового тока, тяжеловесное движение, отказы рельсовых цепей, задержки поездов.

Summary

The paper investigates the limits of change in resistance value of traction rail network elements due to dynamic loads arising during the movement of trains with increased weight and length. An augmented electric diagram of rail joint with a duplicating junction coupler taken into account has been presented. The ways of traction current flow during simultaneous passing of heavy-weight trains along the adjacent track connected by intertrack junctions have been determined. Conclusions have been made about the necessity of constant monitoring of traction rail network elements condition, which can be ensured only by implementing special automated systems.

Keywords: traction rail network, traction current channelisation, traction current asymmetry, heavy traffic, rail circuit failures, train delays.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-52-58

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Развитие тяжеловесного движения на сети железных дорог ОАО «РЖД» играет значительную роль в увеличении доли грузов, перевозимых железнодорожным транспортом, положительно влияет на экономические и имиджевые показатели компании-перевозчика. Однако рост осевой нагрузки с 23,5 до 27 тс и увеличение массы поездов до 9000 т требует модернизации существующей инфраструктуры и повышенного внимания в процессе ее эксплуатации.

Один из объектов инфраструктуры, наиболее подверженных влиянию динамических нагрузок на участках с тяжеловесным движением, — тяговая рельсовая сеть (ТРС). Из-за обращения поездов повышенной массы и длины ослабление усилия затяжки болтовых соединений в элементах ТРС происходит за меньшее время по сравнению с участками, где тяжеловесное движение отсутствует. Также возрастает степень износа соединителей и перемычек. Как следствие, увеличивается сопротивление рельсовых нитей и возникает продольная асимметрия тягового тока, приводящая к отказам рельсовых цепей [1].

Целью представленного в статье исследования является анализ путей протекания тягового тока по ТРС в зависимости от ее конфигурации и состояния элементов.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

провести исследование величины изменения сопротивления элементов ТРС тяговому току в условиях воздействия динамических нагрузок, пренебрегая при этом факторами окружающей среды (такими как температура и влажность) и температурой нагрева вследствие протекания тягового тока;

составить схему замещения участка ТРС с учетом полученных значений сопротивления элементов;

проанализировать влияние междупутных перемычек (МДП) на величину продольной асимметрии тягового тока.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЯГОВОЙ РЕЛЬСОВОЙ СЕТИ ТЯГОВОМУ ТОКУ

Причина увеличения сопротивления рельсов тяговому току заключается в образовании дефектов как внутри, так и на поверхности рельса. Поврежденные рельсы по типу дефекта относят к остродефектным, когда изломы, трещины и выколы угрожают безопасности движения поездов, а также к дефектным, которые не влияют на безопасность движения, но приводят к ограничению скорости в случае превышения допустимых нормативных значений [2].

Рассмотрим рельсы типа Р65 и Р75, укладываемые на участках с тяжеловесным движением. Площадь поперечного сечения рельса Р65 и рельса Р75 составляет соответственно $S_{P65} = 8265 \text{ мм}^2$ и $S_{P75} = 9504 \text{ мм}^2$ [3]. Учитывая, что удельное электрическое сопротивление рельсовой стали $\rho_{pc} = 0,21 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, определим величину сопротивления постоянному току одного рельса обоих типов при температуре +20 °С по формуле

$$R_{PN} = \frac{\rho_{pc} \cdot l_p}{S_{PN}} \quad (1)$$

Таким образом, при длине $l_p = 25 \text{ м}$ сопротивление одного рельса типа Р65 составит 635,2 мкОм, а рельса типа Р75 будет равно 552,4 мкОм.

Проанализируем влияние дефекта рельса на величину его сопротивления (рис. 1 и 2). Для этого воспользуемся формулой

$$R_{ДРН} = \frac{\rho_{pc} \cdot (l_p - l_d)}{S_{PN}} + \frac{\rho_{pc} \cdot l_d}{S_{PN} - b_d \cdot h_d}, \quad (2)$$

где l_d , h_d и b_d — соответственно длина (м), глубина (мм) и ширина (мм) дефекта.

Стоит подчеркнуть, что участком, наиболее трудным для определения дефекта рельса, является его подошва, которая к тому же подвержена коррозии, часто наблюдаемой в области подкладок [4]. Появление трещин глубиной 1 мм по всей ширине подошвы рельса уменьшает площадь поперечного сечения на 132 (тип Р65) и 150 мм² (тип Р75), что негативно сказывается на проводимости рельса. Согласно [2], замене подлежат только те рельсы, у которых глубина поражения общей равномерной коррозией превышает 3 и 4 мм (соответственно для типа Р65 и типа Р75). Проведенный анализ показывает, что из-за возникающих дефектов сопротивление рельса может увеличиваться на 6,74%.

Сопротивление сборного токопроводящего рельсового стыка (СТРС) $R_{СТРС}$ (рис. 3) в работе [5] рассматривается как совокупность сопротивлений рельсовых накладок $R_{Н}$, приварного соединителя $R_{ПС}$ и переходных сопротивлений «рельс — накладка» $R_{РН}$ и «медь — сталь» $R_{МС}$.

При этом для улучшения токопроводимости стыка, а также для стабилизации переходного сопротивления СТРС обору́дуются дублирующим стыковым соединителем [6], обладающим сопротивлением $R_{ДС}$ и переходным сопротивлением $R_{МСДС}$ в местах его крепления к рельсу. Данное обстоятель-

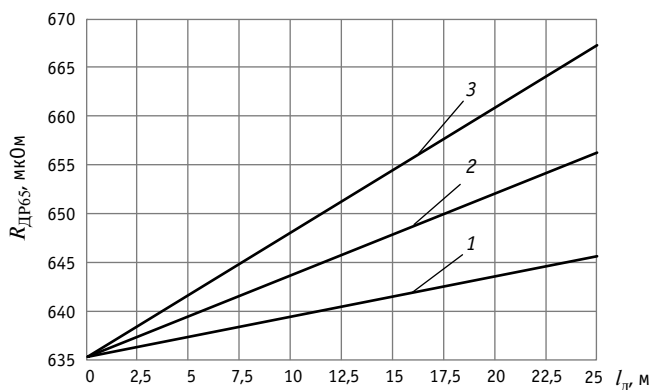


Рис. 1. Зависимость сопротивления рельса марки Р65 от длины дефекта, распространенного по всей ширине подошвы на глубину 1 мм (1), 2 мм (2), 3 мм (3)

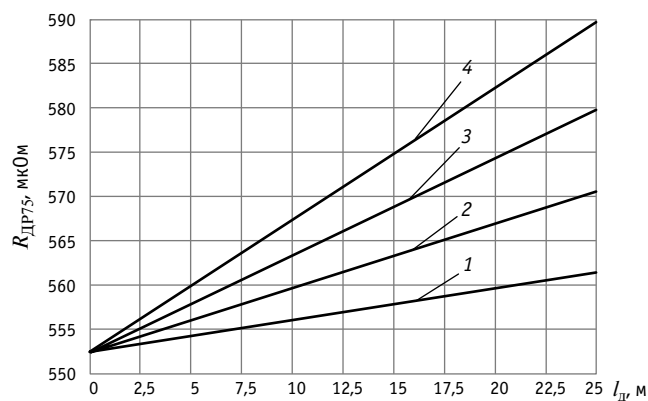


Рис. 2. Зависимость сопротивления рельса марки Р75 от длины дефекта, распространенного по всей ширине подошвы на глубину 1 мм (1), 2 мм (2), 3 мм (3), 4 мм (4)



Рис. 3. Сборный токопроводящий рельсовый стык

ство необходимо учитывать в схеме замещения СТРС (рис. 4). Тогда полное сопротивление первой и второй накладок запишем соответственно как

$$R_1 = \frac{R_{RH11} \cdot R'_{RH11}}{R_{RH11} + R'_{RH11}} + \frac{R_{RH12} \cdot R'_{RH12}}{R_{RH12} + R'_{RH12}} + R_{Н1}; \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{R_{RH21} \cdot R'_{RH21}}{R_{RH21} + R'_{RH21}} + \frac{R_{RH22} \cdot R'_{RH22}}{R_{RH22} + R'_{RH22}} + R_{Н2}. \quad (4)$$

Общее сопротивление соединителей:

$$R_c = \frac{(R_{МС} + R_{ПС} + R'_{МС}) \cdot (R_{МСДС} + R_{ДС} + R'_{МСДС})}{R_{МС} + R_{ПС} + R'_{МС} + R_{МСДС} + R_{ДС} + R'_{МСДС}}. \quad (5)$$

Таким образом, полное сопротивление СТРС представим в виде

$$R_{СТРС} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_c}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_c + R_2 \cdot R_c} \quad (6)$$

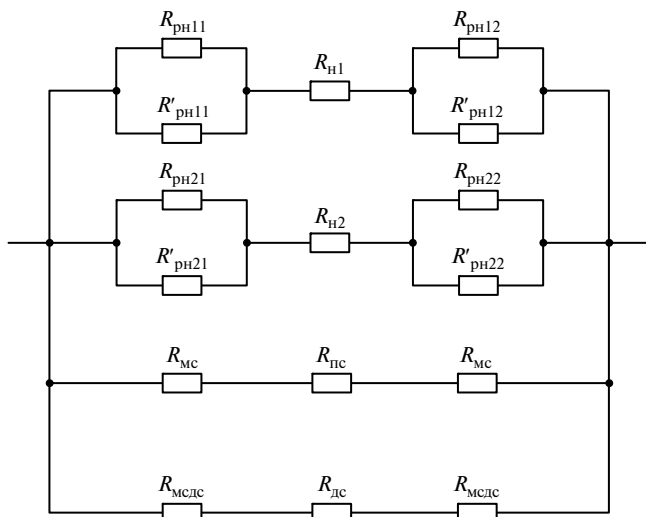


Рис. 4. Электрическая схема замещения сборного токопроводящего рельсового стыка

При этом также следует учитывать аспекты, влияющие на изменение сопротивления СТРС:

- натяжение стыковых болтов ниже нормативных значений;
- обрыв или отсутствие приварного соединителя;
- дефекты рельса в зоне стыка;
- загрязнение поверхностей накладок СТРС в местах соприкосновения с рельсом.

В работе [7] опытным путем получены следующие формулы для определения переходного сопротивления «рельс — накладка»:

при контакте загрязненных поверхностей рельса и накладки

$$R_{рн} = \frac{4402}{Q_3^{0,42}} \cdot \frac{1}{S_{рн}^{0,15}} \quad (7)$$

для зачищенных поверхностей

$$R_{рн} = \frac{293}{Q_3^{0,4}} \cdot \frac{1}{S_{рн}^{0,15}} \quad (8)$$

где Q_3 — усилие натяжения стыковых болтов, кН;

$S_{рн}$ — площадь контакта «рельс — накладка», м².

Отметим, что для зачищенных поверхностей $R_{рн} = 10$ – 15 мкОм, хотя в условиях эксплуатации может достигать значений 3000 мкОм вследствие ухудшения контакта из-за слабого натяжения болтов [8].

Сопротивление накладки R_H длиной l_H и площадью поперечного сечения S_H определим по формуле

$$R_H = \frac{\rho_{пс} \cdot l_H}{S_H} \quad (9)$$

Так как площадь поперечного сечения накладки $S_H = 3875$ мм², а стандартная длина шестидырной накладки типа 1Р65/2Р65 имеет значение $l_H = 1$ м, сопротивление накладки составит $R_H = \frac{0,21 \cdot 1}{3875} = 54,2$ мкОм.

Сопротивление приварного соединителя $R_{пс}$ определим по формуле

$$R_{пс} = \frac{\rho_M \cdot l_{пс}}{S_{пс}} \quad (10)$$

где ρ_M — удельное электрическое сопротивление материала;

$l_{пс}$ — длина приварного соединителя;

$S_{пс}$ — площадь поперечного сечения приварного соединителя.

На электрифицированных железных дорогах постоянного тока применяют приварные соединители с сечением медного троса 70 мм² [9]. Длина соединителя в развернутом виде $l_{пс} = 0,2$ м, а удельное электрическое сопротивление меди $\rho_{меди} = 0,017$ Ом·мм²/м, тогда сопротивление

$$R_{пс} = \frac{0,017 \cdot 0,2}{70} = 48,6 \text{ мкОм.}$$

Если в приварном соединителе используется сталемедный провод, удельное электрическое сопротивление которого $\rho_{см} = 0,053$ Ом·мм²/м [10], то сопротивление

$$R_{пс} = \frac{0,053 \cdot 0,2}{70} = 151,5 \text{ мкОм.}$$

По аналогичной формуле найдем сопротивление дублирующего стыкового соединителя $R_{дс}$:

$$R_{дс} = \frac{\rho_M \cdot l_{дс}}{S_{дс}} \quad (11)$$

где $l_{дс}$ и $S_{дс}$ — соответственно длина (м) и площадь (мм²) дублирующего стыкового соединителя.

Принимая длину дублирующего стыкового соединителя $l_{дс} = 1,2$ м, найдем его сопротивление с учетом того, что площадь поперечного сечения $S_{дс} = S_{пс}$, поскольку род тяги остается неизменным. Тогда при использовании медного соединителя $R_{дс} = \frac{0,017 \cdot 1,2}{70} = 291,4$ мкОм, а при использовании

$$\text{сталемедного } R_{дс} = \frac{0,053 \cdot 1,2}{70} = 908,5 \text{ мкОм.}$$

Проанализируем величину сопротивления СТРС в зависимости от изменения переходного сопротивления «рельс — накладка» (рис. 5), принимая значения $R_{мс} = 35$ мкОм и $R_{мдс} = 40$ мкОм.

Как видно из рис. 5, даже при переходном сопротивлении «рельс — накладка», достигающем величины $R_{рн} = 3000$ мкОм, сопротивление СТРС не превышает нормативного значения 200 мкОм. Однако в случае хорошего контакта между рельсом и накладкой, когда величина переходного сопротивления $R_{рн} = 10$ мкОм, сопротивление стыка с медными соединителями $R_{СТРС} = 23,7$ мкОм, а со сталемедными $R_{СТРС} = 27,4$ мкОм, что в $7,5$ раза меньше верхнего предела допустимой нормы.

Рельсовые нити ТРС и выводы дроссель-трансформатора (ДТ) соединяются с помощью дроссельных переключек. В условиях тяжеловесного движения необходимо использовать

перемычки, способные пропускать ток более 1500 А. Одна из разновидностей таких дроссельных перемычек — сталемедная перемычка типа ДМС-120х4–4200, состоящая из четырех сталемедных проводов, общая площадь сечения которых $S_{дп} = 480 \text{ мм}^2$, а длина $l_{дп} = 4,2 \text{ м}$. Сопротивление дроссельной перемычки определим по формуле

$$R_{дп} = \frac{\rho_{см} \cdot l_{дп}}{S_{дп}} = \frac{0,053 \cdot 4,2}{480} = 463,8 \text{ мкОм}. \quad (12)$$

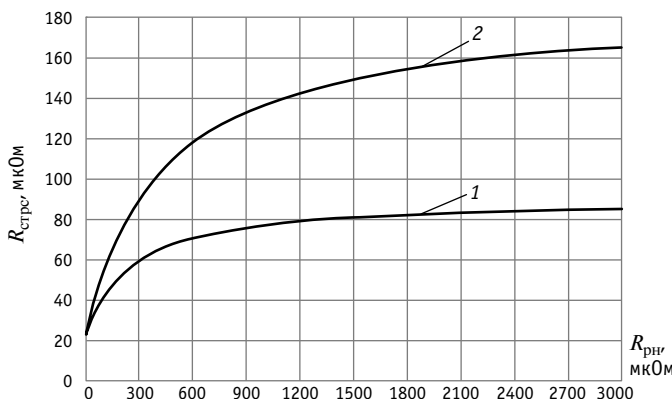


Рис. 5. Зависимость сопротивления сборного токопроводящего стыка от переходного сопротивления «рельс – накладка» при использовании в соединителях медного (1) и сталемедного (2) провода

С учетом переходных сопротивлений «рельс — дроссельная перемычка» $R_{рдп}$ и «дроссельная перемычка — вывод ДТ», составляющих в норме $R_{дпт} = R_{рдп} = 30 \text{ мкОм}$ [11], получим полное сопротивление дроссельной перемычки:

$$R_{дпт} = R_{дп} + R_{рдп} + R_{дпт} = R_{дп} + 2R_{дпт} = 463,8 + 2 \cdot 30 = 523,8 \text{ мкОм}. \quad (13)$$

Для междроссельной перемычки (МДП) сопротивление определим по формуле

$$R_{пмп} = R_{мп} + R_{пдт1} + R_{пдт2}, \quad (14)$$

где $R_{мп}$ — совокупное сопротивление жил МДП;
 $R_{пдт1}$ — переходное сопротивление «дроссель-трансформатор передающего конца рельсовой цепи — вывод ДТ»;
 $R_{пдт2}$ — переходное сопротивление «дроссель-трансформатор приемного конца рельсовой цепи — вывод ДТ».

Для участков с тяжеловесным движением следует применять перемычки, которые обладают суммарной площадью сечения жил, достаточной для пропуска тяговых токов более 3000 А. Рассмотрим междроссельную перемычку типа ММСЭ-120х8-700, длина которой составляет $l_{мп} = 0,7 \text{ м}$, суммарная площадь поперечного сечения $S_{мп} = 960 \text{ мм}^2$, а удельное электрическое сопротивление провода марки ПБСМЭ, из которого сделаны жилы МДП, $\rho_{мп} = 0,03 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ [12]. Тогда совокупное сопротивление всех жил МДП:

$$R_{мп} = \frac{\rho_{мп} \cdot l_{мп}}{S_{мп}} = \frac{0,03 \cdot 0,7}{960} = 21,9 \text{ мкОм}. \quad (15)$$

Принимая $R_{пдт1} = R_{пдт2} = 30 \text{ мкОм}$, получим полное сопротивление междроссельной перемычки $R_{пмп} = 21,9 + 2 \cdot 30 = 81,9 \text{ мкОм}$.

Сопротивление основной обмотки дроссель-трансформатора ДТ-0,2-1500 постоянному току составляет $R_{оо} = 500 \pm 50 \text{ мкОм}$, следовательно, сопротивление полуобмотки будет равно

$$R_{по} = \frac{R_{оо}}{2} = 250 \pm 25 \text{ мкОм}. \text{ Для дроссель-трансформатора}$$

типа ДТ-0,4-1500 $R'_{оо} = 800 \pm 80 \text{ мкОм}$, соответственно

$$R'_{по} = \frac{R'_{оо}}{2} = 400 \pm 40 \text{ мкОм} \quad [11].$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЯГОВОЙ РЕЛЬСОВОЙ СЕТИ

На основе данных, полученных в предыдущем разделе, выполним синтез схемы замещения участка ТРС, ограниченного междупутными перемычками (МПП), которые подключены через четыре рельсовые цепи друг от друга, что определено действующей нормативной документацией (рис. 6) [6]. Сопротивление одной рельсовой нити с присоединенными дроссельными перемычками и учетом сопротивления полуобмоток ДТ выразим формулой

$$R_{прн} = R_{по} + R_{пмп} + \sum_{n=1}^k R_{нстрс} + \sum_{j=1}^p R_{jнстрс} + \sum_{h=1}^g R_{hДРП} + R'_{по} + R'_{пмп}, \quad (16)$$

где $R_{нстрс}$ — сопротивление неисправных СТРС, превышающее нормативное значение.

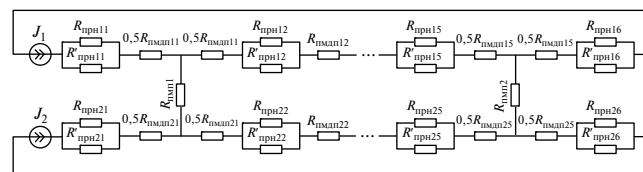


Рис. 6. Электрическая схема замещения участка ТРС

Для моделирования зададим следующие условия: длина участка ТРС, ограниченного ДТ, $l_{уч} = 800 \text{ м}$, соответственно количество рельсов $g = \frac{l_{уч}}{l_p} = \frac{800}{25} = 32$, а число СТРС $c = g - 1 = 32 - 1 = 31$. Сопротивление рельсовых нитей $R_{прн}$ разделим на два типа: $R_{мин} = 22954,5 \text{ мкОм}$ — минимально возможное, $R_{макс} = 29248 \text{ мкОм}$ — максимально возможное, при котором сопротивления элементов ТРС не превышают установленные нормативные значения.

Длину МПП $l_{мп}$ примем равной 7 м, а суммарную площадь поперечного сечения $S_{пмп}$ равной 240 мм^2 . Тогда полное сопротивление составит

$$R_{\text{МП}} = \frac{\rho_{\text{см}} \cdot l_{\text{МП}}}{S_{\text{МП}}} + 2 \cdot R_{\text{МПДП}} = \frac{0,053 \cdot 7}{240} + 2 \cdot 30 = 1605,8 \text{ мкОм}, \quad (17)$$

где $R_{\text{МПДП}}$ — переходное сопротивление «междупутная перемычка — междурельсовая перемычка».

Условно примем, что

$$\begin{aligned} R_{\text{ПРН22}} = R'_{\text{ПРН22}} = R_{\text{ПРН23}} = R'_{\text{ПРН23}} = R_{\text{ПРН24}} = R'_{\text{ПРН24}} = \\ = R_{\text{ПРН25}} = R'_{\text{ПРН25}} = R'_{\text{ПРН12}} = R_{\text{МАКС}}; \\ R_{\text{ПРН11}} = R'_{\text{ПРН11}} = R_{\text{ПРН21}} = R'_{\text{ПРН21}} = R_{\text{ПРН12}} = R_{\text{ПРН13}} = \\ = R'_{\text{ПРН13}} = R_{\text{ПРН14}} = R'_{\text{ПРН14}} = R_{\text{ПРН15}} = R'_{\text{ПРН15}} = R_{\text{ПРН16}} = \\ = R'_{\text{ПРН16}} = R_{\text{ПРН26}} = R'_{\text{ПРН26}} = R_{\text{МИН}}. \end{aligned}$$

В этом случае эквивалентная схема замещения участка ТРС примет вид, показанный на рис. 7.

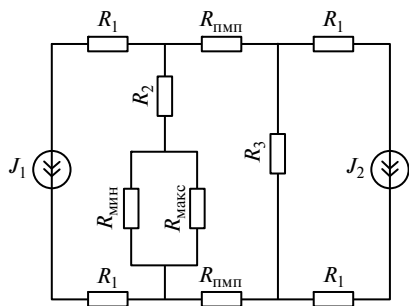


Рис. 7. Эквивалентная схема замещения участка ТРС

Для этого случая $R_1 = 0,5(R_{\text{МИН}} + R_{\text{МПДП}})$, $R_2 = 1,5R_{\text{МИН}} + 4R_{\text{МПДП}}$, $R_3 = 2(R_{\text{МАКС}} + 2R_{\text{МПДП}})$. Источники J_1, J_2 имитируют ток, потребляемый электроподвижным составом, проходящим по первому и второму пути соответственно. Применяя метод контурных токов, получим уравнение для определения тока асимметрии между рельсовыми нитями, представленными на схеме замещения сопротивлениями $R_{\text{МИН}}$ и $R_{\text{МАКС}}$:

$$I_a = \left[\frac{R_{\text{МИН}}}{R_{\text{МАКС}} + R_{\text{МИН}}} \left[J_1 - \frac{J_1 \cdot \left(R_2 + \frac{R_{\text{МИН}} \cdot R_{\text{МАКС}}}{R_{\text{МАКС}} + R_{\text{МИН}}} \right) - J_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3 + 2R_{\text{МПДП}} + \frac{R_{\text{МИН}} \cdot R_{\text{МАКС}}}{R_{\text{МАКС}} + R_{\text{МИН}}}} \right] - \frac{R_{\text{МАКС}}}{R_{\text{МАКС}} + R_{\text{МИН}}} \left[J_1 - \frac{J_1 \cdot \left(R_2 + \frac{R_{\text{МИН}} \cdot R_{\text{МАКС}}}{R_{\text{МАКС}} + R_{\text{МИН}}} \right) - J_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3 + 2R_{\text{МПДП}} + \frac{R_{\text{МИН}} \cdot R_{\text{МАКС}}}{R_{\text{МАКС}} + R_{\text{МИН}}}} \right] \right]. \quad (18)$$

Проанализируем величину тока асимметрии участка ТРС, расположенного на первом пути при движении по нему поезда, потребляющего ток J_1 , в зависимости от тока J_2 , соответствующего току, потребляемому поездом, пропуск которого осуществляется по второму пути (рис. 8).

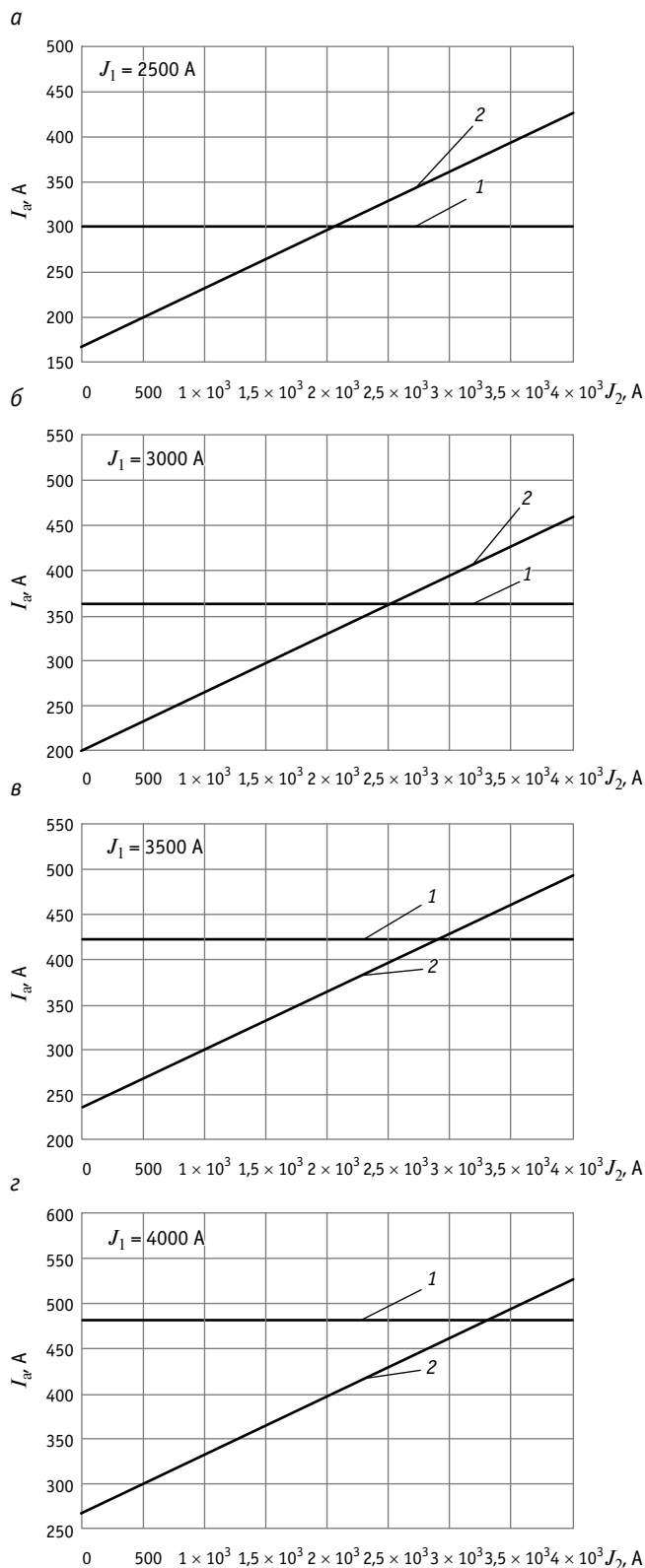


Рис. 8. Зависимость тока асимметрии от величины тягового тока, потребляемого поездом, движению которого осуществляется по смежному пути: 1 — МПП отсутствуют; 2 — с установленными МПП

Полученные зависимости (см. рис. 8) позволяют сделать вывод, что установка МПП способствует равномерному распределению тягового тока по ТРС, а при отсутствии на смежном пути тягового электроподвижного состава обеспечивает снижение тока асимметрии.

Однако при увеличении тока J_2 до значений, приведенных в табл. 1, МПП негативно влияет на величину продольной асимметрии тягового тока, что недопустимо и противоречит концепции использования МПП [13].

Таблица 1

Значения тяговых токов, при которых МПП оказывает влияние на рост тока асимметрии

J_1, A	2500	3000	3500	4000
J_2, A	> 2069	> 2483	> 2896	> 3310

В рассматриваемых условиях при тяговом токе $J_1 = J_2 = 4000 A$ асимметрия достигнет величины $I_a = 526,6 A$, что превышает не только максимально допустимые значения, установленные в [9], но и нормируемые заводом-изготовителем [11]. Необходимо также отметить, что увеличение сопротивления любого из элементов ТРС сверх нормативных значений приведет к еще большему росту тока асимметрии, в результате чего он превысит допустимые значения, полученные практическим путем [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать выводы о том, что разница сопротивлений рельсовых нитей тяговому току при наилучших условиях состояния элементов и условиях максимально допустимого отклонения от нормы составляет более 27%.

Междупутная перемычка способствует равномерному распределению тягового тока по ТРС. Однако в случае появления продольной асимметрии тягового тока на одном из двух путей, связанных МПП, одновременное движение по этим путям поездов, потребляющих тяговый ток, величина которого стремится к максимально возможному для данного участка, приводит к увеличению тока асимметрии, что негативно сказывается на работе устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

На участках с тяжеловесным движением необходим особый контроль состояния элементов ТРС, поскольку периодические проверки работниками дистанций инфраструктуры не гарантируют безотказной работы ТРС. Процесс контроля осложняется при высокой интенсивности движения, когда износ элементов происходит значительно быстрее, а обеспечить их качественную проверку не представляется возможным из-за минимального межпоездного интервала.

Таким образом, можно резюмировать, что мониторинг состояния элементов тяговой рельсовой сети — одна из важнейших задач в условиях тяжеловесного движения. При этом надлежащий контроль может быть достигнут только за счет внедрения специальных автоматизированных систем, которые позволят обеспечить функционирование ТРС с заданным качеством.

Литература

1. Рожкин Б. В. Оценка готовности устройств автоматики к пропуску тяжеловесных поездов // Транспорт Урала. 2016. № 1 (48). С. 61–65. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-61-65. ISSN 1815-9400.
2. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefektnykh рельсов : инструкция. Москва : ОАО «РЖД», 2014. 144 с.
3. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 96 с.
4. Преображенский М. Н., Щерба К. А. Особенности выявления коррозионно-усталостных трещин в подошве рельса // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1 (51). С. 79–81. ISSN 1609–3178.
5. Григорьев В. Л., Лабунский Л. С. Комплексное решение проблемы рельсового стыка электрифицированного транспорта : монография. Самара : СамГАПС, 2005. 127 с.
6. Нормы технологического проектирования устройств автоматики и телемеханики на федеральном железнодорожном транспорте. НТП СЦБ/МПС-99 : утв. 24.06.1999 г. № А-1113 / МПС РФ, Гипротранссигнальсвязь. Санкт-Петербург, 1999.
7. Григорьев В. Л. Исследование и оптимизация электропроводности рельсовых стыков и разработка методов их диагностики в системе электроснабжения электрических железных дорог : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1981. 15 с.

References

1. Rozhkin B. V. Assessment of readiness of automation devices for heavy train traffic [Otsenka gotovnosti ustroystv avtomatiki k propusku tyazhelovesnykh poezdov] // Transport of the Urals. 2016. No. 1 (48). Pp. 61–65. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-61-65. ISSN 1815-9400.
2. Rail defects. Classification, catalogue and parameters of defective and acutely defective rails [Defekty rel'sov. Klassifikatsiya, katalog i parametry defektnykh i ostrokefektnykh rel'sov] : instruction. Moscow : JSC «RZD», 2014. 144 p.
3. GOST P 51685–2013. Railway rails. General specifications [Rel'sy zheleznodorozhnye. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 96 p.
4. Preobrazhenskiy M. N., Shherba K. A. Features of corrosion fatigue cracks detection in rail foot [Osobennosti vyyavleniya korrozionno-ustalostnykh treshhin v podoshve rel'sa] // NDT World. 2011. No. 1 (51). Pp. 79–81. ISSN 1609–3178.
5. Grigoryev V. L., Labunskiy L. S. A comprehensive solution to the electrified transport rail joint problem [Kompleksnoe reshenie problemy rel'sovogo styka elektrifitsirovannogo transporta] : monograph. Samara : SamGAPS, 2005. 127 p.
6. Norms of technological design of automation and telemechanics devices on the federal railway transport [Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya ustroystv avtomatiki i telemekhaniki na federal'nom zheleznodorozhnom transporte]. NTP SCSB/MPS-99 : approved by the Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 24.06.1999 No. A-1113. St. Petersburg, 1999.
7. Grigoryev V. L. Research and optimisation of the electrical conductivity of rail joints and development of methods for their diagnostics in the electricity supply system of electric railways [Issledovanie i optimizatsiya elektroprovodnosti rel'sovykh stykov i razrabotka metodov ikh diagnostiki v sisteme elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 1981. 15 p.

8. Бошкарёва Т. В. Совершенствование конструкции токопроводящего рельсового стыка в системе тягового электроснабжения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара, 2011. 154 с.
 9. Устройства и элементы рельсовых линий и тяговой рельсовой сети. Технические требования и нормы содержания. Москва : ОАО «РЖД», 2012. 40 с.
 10. ГОСТ 3822–79. Проволока биметаллическая сталемедная. Технические условия. Москва : Издательство стандартов, 1980. 6 с.
 11. Сороко В. И., Фоткина Ж. В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики. Т. 1. Москва : Планета, 2013. 1060 с.
 12. ТУ 3510-001-78858250-2005. Провода сталемедные эластичные марки ПБСМЭ для дроссельных, междроссельных и междупутных перемычек и электротяговых соединителей при электрической тяге постоянного и переменного тока.
 13. Наумов А. В., Наумов А. А. Выбор места подключения междупутных перемычек // Автоматика, связь, информатика. 2015. № 10. С. 8–11. ISSN 0005–2329.
 14. Наумов А. В., Наумов А. А. Выбор параметров и правила построения обратной тяговой рельсовой сети на электрифицированных железных дорогах со скоростным и тяжеловесным движением. Москва : Интекст, 2006. 143 с.
8. Boshkareva T. V. Improving the design of the conductive rail joint in the traction power supply system [Sovershenstvovanie konstruktssii tokoprovodyashhego rel'sovogo styka v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya] : PhD in Engineering Thesis. Samara, 2011. 154 p.
 9. Devices and elements of track circuits and reverse traction network. Technical specifications and maintenance standards [Ustroystva i elementy rel'sovykh liniy i tyagovoy rel'sovoy seti. Tekhnicheskie trebovaniya i normy sodержaniya]. Moscow : JSC «RZD», 2012. 40 p.
 10. GOST 3822–79. Bimetallic copper-steel wire. Specifications [Provoloka bimetallicheskaya stalemednaya. Tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Publishing House of Standards, 1980. 6 p.
 11. Soroko V. I., Fotkina Zh. V. Railways automation and telemechanics equipment [Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki]. Vol. 1. Moscow : Planet, 2013. 1060 p.
 12. TU 3510-001-78858250-2005. Steel-copper elastic PBSME wires for throttle, inter-throttle and inter-track jumpers and electric traction connectors in DC and AC electric traction [Provoda stalemednye elastichnye marki PB-SME dlya drossel'nykh, mezhdrossel'nykh i mezhduputnykh peremychek i elektrotyagovykh soediniteley pri elektricheskoy tyage postoyannogo i peremennogo toka].
 13. Naumov A. V., Naumov A. A. The choice of connection megaputer jumpers [Vybor mesta podklyucheniya mezhduputnykh peremychek] // Automation, communication and informatics. 2015. No. 10. Pp. 8–11. ISSN 0005–2329.
 14. Naumov A. V., Naumov A. A. The choice of parameters and rules for the construction of the inverse traction rail network on electrified railways with high-speed and heavy-duty traffic [Vybor parametrov i pravila postroeniya obratnoy tyagovoy rel'sovoy seti na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh so skorostnym i tyazhelovesnym dvizheniem]. Moscow : Intext, 2006. 143 p.

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 625.111

Вячеслав Анатольевич Подвербный, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,
Петр Николаевич Холодов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия

РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ ПО ПЕРЕЛОМУ МАССЫ СОСТАВА

Vyacheslav Anatolyevich Podverbnyy, DSc in Engineering, Professor, Construction of Railways, Bridges and Tunnels Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia,

Petr Nikolaevich Kholodov, PhD in Engineering, Associate Professor, Construction of Railways, Bridges and Tunnels Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia

Calculation of operating costs on change of train weight

Аннотация

Показана актуальность расчета эксплуатационных расходов по перелому массы состава при проектировании новой железнодорожной линии в Иркутской области. Рассмотрена существующая методика и сформулированы основные вопросы для исследования. Предложена схема к расчету дополнительных эксплуатационных расходов при переломе с уменьшением и увеличением массы подвижного состава. Исследованы зависимости годовых эксплуатационных расходов, связанных с переломом массы составов, от меньшей массы поезда в пункте перелома массы. Разработана программа расчета эксплуатационных расходов. Рассмотрен тестовый пример для двух вариантов трассы проектируемой линии с тепловозной тягой (тип локомотива — тепловоз 2ТЭ10М) при переломе массы состава на станции Узловой.

Ключевые слова: эксплуатационные расходы, перелом массы состава, дополнительные станционные пути, транзитные порожние поезда, меньший вес поездов.

Summary

The urgency of studying this issue when designing a new railway line in the Irkutsk region is shown. The existing methodology for calculating operating costs on change of train weight is considered and the main questions for the study are formulated. The dependences of the annual operating costs associated with the change of train weight on the smaller mass of the train at the point of change of train weight are investigated. A program for calculating operating costs on change of train weight has been developed. A test example is considered for two variants of the route of the projected line with diesel traction (locomotive type — diesel locomotive 2TE10M) when the mass of the train is broken at the Uzlovaya station.

Keywords: calculation of operating costs, change of train weight, additional station tracks, transit empty trains, less train weight.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-59-64

ВВЕДЕНИЕ

Стратегическое планирование железных дорог до 2030 г. рассчитано на развитие не только железнодорожной отрасли, но и экономики страны в целом [1, 2].

Стратегия [1] предусматривает усиление и модернизацию многих существующих линий, в том числе сооружение вторых и третьих путей, электрификацию участков, оснащение их автоблокировкой, строительство обходов крупных железнодорожных узлов. Значительные работы предстоит выполнить по реконструкции инженерных сооружений, превысивших нормативный срок эксплуатации, — мостов и тоннелей.

Многие запланированные мероприятия уже удалось осуществить. Например, в Сибири и на Дальнем Востоке во время выполнения первого этапа Стратегии развития железнодорожного транспорта были построены (близки к завершению) такие линии, как Томмот — Кердем — Якутск (Нижний Бестях), Нарын — Лугокан, Улак — Эльга, Карабула — Ярки и др., проведены значительные работы по реконструкции протяженных участков Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной железных дорог [1, 2].

В Стратегии [1] впервые выделены шесть категорий строящихся и реконструируемых железнодорожных линий (стратегические, социально значимые, грузообразующие, технологические, высокоскоростные и модернизируемые действующие) с учетом того, кто именно получит наибольшую выгоду от их эксплуатации — государство, бизнес, ОАО «РЖД» или регион.

Был предложен принцип «строит выгодополучатель, то есть получатель наиболее существенных эффектов от развития и модернизации сети железных дорог». В зависимости от предложенных категорий планировалось формировать и инвестиционные механизмы строительства объектов [1, 2].

Сегодня можно отметить, что не во всех проектах такой подход оправдал себя, так как важное значение имеют выявление истинных, а не декларируемых намерений частного бизнеса, более внимательное отношение ко всем инвестиционным рискам, многовариантный расчет сценариев инвестпроекта [3].

Именно поэтому совершенствование методики расчета эксплуатационных расходов по перелому массы подвижного состава остается актуальным.

Так, в Иркутской области в соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта предусматривается строительство новых железных дорог (например, участка Северо-Сибирской магистрали, линии Лена — Ленск). В настоящее время по программе развития Восточного полигона идет строительство вторых путей, двухпутных вставок, завершено строительство Второго Байкальского тоннеля (Дабанского тоннеля).

Кроме железных дорог, строительство которых запланировано, в Иркутской области и Республике Бурятия проектируются дороги низких категорий, основное предназначение которых — перевозки полезных ископаемых и ресурсов к станциям сети существующих железных дорог.

Например, для повышения эффективности схемы перевозки угля до Гусиноозерской ГРЭС запроектированы шесть вариантов возможных направлений новой железнодорожной линии, соединяющей разрез Окино — Ключи и существующую железную дорогу Улан-Удэ — Наушки. Причем пять вариантов запроектированы по долине р. Чикой и логам Заганского хребта с уклоном 18 %, что приведет к перелому массы состава на станции примыкания к линии Улан-Удэ — Наушки [4].

Рассмотрим методику расчета эксплуатационных расходов по перелому массы состава и сформулируем основные вопросы для исследования.

ПОСТАНОВКА ВОПРОСОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время расчеты эксплуатационных расходов выполняются по формуле из методических указаний [5]. В [5] дается ссылка на работу [6], в которой установлено, что годовые эксплуатационные расходы по перелому массы составов $\Theta_{\text{пм}}$ тыс. руб., включают:

годовые эксплуатационные расходы, связанные с простоем отцепленных групп вагонов под накоплением (при переломе массы в сторону ее уменьшения) или для пополнения проходящих поездов (при переломе массы в сторону ее увеличения) $\Theta_{\text{нак}}$;

годовые эксплуатационные расходы, связанные с дополнительной задержкой транзитных поездов при увеличении или уменьшении массы составов $\Theta_{\text{тр}}$;

годовые эксплуатационные расходы, связанные с расформированием для пополнения проходящих поездов при увеличении или с формированием из отцепленных групп вагонов при уменьшении массы составов $\Theta_{\text{расф(форм)}}$;

годовые эксплуатационные расходы, связанные с переломом массы составов в сторону увеличения или уменьшения $\Theta_{\text{ман}}$;

годовые приведенные затраты, связанные с сооружением и содержанием дополнительных станционных путей в пунктах перелома массы составов $\Theta_{\text{путь}}$;

годовые эксплуатационные расходы на увеличение штата технических контор и пунктов технического осмотра вагонов $\Theta_{\text{шт}}$.

Таким образом, годовые эксплуатационные расходы, связанные с переломом массы составов $\Theta_{\text{пм}}$ для каждого пункта могут быть вычислены по формуле

$$\Theta_{\text{пм}} = \Theta_{\text{нак}} + \Theta_{\text{тр}} + \Theta_{\text{расф(форм)}} + \Theta_{\text{ман}} + \Theta_{\text{путь}} + \Theta_{\text{шт}} \quad (1)$$

Для среднесетевых условий суммарные эксплуатационные расходы при переломе массы составов, тыс. руб./год, определяются по формуле [5]

$$\Theta_{\text{пм}} = \Theta_{\text{пм(м)}} + \Theta_{\text{пм(б)}} + 2 \cdot \Theta_{\text{об}}, \quad (2)$$

где $\Theta_{\text{пм(м)}}$ и $\Theta_{\text{пм(б)}}$ — расходы при переломе с уменьшением и увеличением массы состава соответственно;

$\Theta_{\text{об}}$ — общие расходы в пункте перелома по содержанию дополнительных путей и дополнительного штата.

Расходы при переломе с уменьшением и с увеличением массы состава рассчитывают соответственно по формулам [5]:

$$\Theta_{\text{пм(м)}} = 0,062 \cdot Q_{\text{м}} + \alpha_{\text{пер(т/о)}} \cdot \Gamma_{\text{(т/о)}} \times \left[4,75 + 18,54 \cdot Q_{\text{м}} \cdot \left(\frac{1}{Q_{\text{м}}} - \frac{1}{Q_{\text{б}}} \right) + 7910 \cdot \left(\frac{1}{Q_{\text{м}}} + \frac{1}{Q_{\text{б}}} \right) \right]; \quad (3)$$

$$\Theta_{\text{пм(б)}} = 0,062 \cdot Q_{\text{м}} + \alpha_{\text{пер(т/о)}} \cdot \Gamma_{\text{(т/о)}} \times \left[4,75 + 8,37 \cdot Q_{\text{м}} \cdot \left(\frac{1}{Q_{\text{м}}} - \frac{1}{Q_{\text{б}}} \right) + 7910 \cdot \left(\frac{1}{Q_{\text{м}}} + \frac{1}{Q_{\text{б}}} \right) \right], \quad (4)$$

где $Q_{\text{м}}$ — меньшая масса состава в пункте перелома, т;

$\alpha_{\text{пер(т/о)}}$ — доля общего грузопотока, подвергаемая перелому массы составов в рассматриваемом направлении движения (туда/обратно);

$\Gamma_{\text{(т/о)}}$ — грузопоток в соответствующем направлении (туда/обратно), млн т/год;

$Q_{\text{б}}$ — большая масса состава в пункте перелома, т.

Общие затраты в пункте перелома массы составов для каждого из направлений (туда/обратно), включающие приведенные затраты по сооружению и содержанию дополнительных станционных путей, а также дополнительные эксплуатационные расходы на увеличение штата технических контор и пунктов технического осмотра вагонов, определяются по формуле из работы [5], при этом предполагается, что для каждого направления сооружается один дополнительный путь:

$$\Theta_{\text{об}} = 20 + 22,48 \cdot l_{\text{ст}}, \quad (5)$$

где $l_{\text{ст}}$ — длина одного дополнительного станционного пути, км.

Длину одного дополнительного станционного пути находят по длине приемоотправочных путей станции примыкания:

$$l_{\text{ст}} = l_{\text{поп}} + 2 \cdot l_{\text{пр}} + 2 \cdot a, \quad (6)$$

где $l_{\text{поп}}$ — полезная длина приемоотправочных путей, км;

$l_{\text{пр}}$ — расстояние от центра перевода до предельного столбика, км (при марке 1/9 принимается равным 0,04336 км);

a — расстояние от переднего стыка рамного рельса до центра стрелочного перевода, км (принимается равным 0,01523 км).

Тогда при $l_{\text{поп}} = 850$ м = 0,850 км значение $l_{\text{ст}}$ согласно формуле (6) будет равно $l_{\text{ст}} = 0,850 + 2 \cdot 0,04336 + 2 \cdot 0,01523 = 0,850 + 0,11718 = 0,967$ км.

Соответственно рассчитанное по формуле (5) значение $\Theta_{\text{об}}$ составит $\Theta_{\text{об}} = 20 + 22,48 \cdot 0,967 = 41,738$ тыс. руб./год.

Проанализировав формулы (2)–(5), авторы статьи задались тремя вопросами.

1. Почему при увеличении разности между Q_M и Q_B расходы по перелому массы составов уменьшаются? Ведь, казалось бы, необходимо совершить больше дополнительной работы, раз больше своеобразная «разность потенциалов» по массе, больше различие в массах составов.

2. Почему всегда предполагается, что на станции перелома массы по каждому из направлений перевозок сооружается лишь один дополнительный станционный путь? Удастся ли сформировать поезд на одном дополнительном пути?

3. Почему никак не учитываются дополнительные расходы на перелом длины порожних поездов на станции перелома? Если на проектируемой линии и линии примыкания различные весовые нормы поездов, скорее всего, на существующей линии, которая уже давно эксплуатируется, масса поезда больше, то вероятно, что при одинаковой средней погонной массе поезда брутто также больше будет и полезная длина приемоотправочных путей на линии примыкания. Но тогда в пункте перелома массы состава происходит перелом длины порожних составов, что вызывает дополнительные эксплуатационные расходы. Почему они не учитываются существующей методикой [5]?

В статье изучены эти вопросы и сформулированы ответы на них.

Следует отметить, что на кафедре «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей» ИрГУПС при дипломном проектировании новой железнодорожной линии обычно выдают учебные карты со сложным пересеченным, предгорным и даже горным рельефом. В связи с этим руководящие уклоны для проектирования задаются довольно крутыми — до 20%. При этом тяга и тип локомотива задаются следующие: тепловозная тяга, локомотив 2ТЭ10М.

Такой выбор тяги для проектируемой линии IV и даже III категории вполне обоснован, поскольку наиболее вероятно предположить желание инвестора снизить первоначальные капиталовложения в подвижной состав и принять тепловозную тягу с магистральным тепловозом небольшой стоимости.

В то же время в задании на проектирование задается район проектирования Иркутская область и для существующей линии приводятся следующие характеристики: руководящий уклон 9%, тяга электрическая переменного тока, тип локомотива ВЛ85.



Следовательно, весьма вероятно ситуация, когда на существующей линии в Иркутской области поезда водят электровозы переменного тока и руководящий уклон равен 9%, в то время как на проектируемой линии рассматриваются уклоны до 20% (иногда и более) и тепловозная тяга с локомотивом 2ТЭ10М, принятым из соображений «оптимизации расходов» при небольших объемах грузовых перевозок и невысокой категории линии. Отсюда вполне вероятно и задача определения эксплуатационных расходов по перелому массы состава на станции примыкания проектируемой линии к существующей сети железных дорог.

Для того чтобы понять существо проблемы, достаточно обратиться к табл. 1, содержащей характеристики двух маги-

стральных локомотивов, которые будут работать на существующей линии и проектируемой новостройке и «встречаться» на станции примыкания, где происходит перелом массы состава.

Таблица 1

Характеристики двух магистральных локомотивов

	
2ТЭ10М (2 секции, 12 осей)	ВЛ85 (2 секции, 12 осей)
$Q_{\max(i_p = 9\%)} = 4700$ т	$Q_{\max(i_p = 9\%)} = 6600$ т
$Q_{\max(i_p = 15\%)} = 2850$ т	$Q_{\max(i_p = 15\%)} = 4050$ т
$Q_{\max(i_p = 20\%)} = 2100$ т	$Q_{\max(i_p = 20\%)} = 3050$ т

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о важности и актуальности задачи уточнения методики расчета эксплуатационных расходов по перелому массы состава, которая поставлена в статье.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ ПРИ ПЕРЕЛОМЕ МАССЫ СОСТАВА

Исследование по первому вопросу

Для исследования функций $\mathcal{E}_{\text{пм}} = f(Q_M)$, вычисляемых по формулам (3) и (4), необходимо упростить их представление.

Допустим, что в тестовом примере параметры существующей линии, эксплуатируемой в Иркутской области, к которой примыкает проектируемая линия, следующие: руководящий уклон $i_p = 9\%$, тяга электрическая на переменном токе, тип локомотива — электровоз ВЛ85, весовая норма поезда $Q_{\max} = 6600$ т, полезная длина приемоотправочных путей 1050 м.

Рассмотрим параметры проектируемой линии по вариантам.

Первый вариант трассы: руководящий уклон $i_{p1} = 15\%$, тяга — тепловозная, тип локомотива — тепловоз 2ТЭ10М, весовая норма поезда $Q_{\max} = 2850$ т, полезная длина приемоотправочных путей 850 м.

Второй вариант трассы: руководящий уклон $i_{p2} = 17\%$, тяга — тепловозная, тип локомотива — тепловоз 2ТЭ10М, весовая норма поезда $Q_{\max} = 2500$ т, полезная длина приемоотправочных путей 850 м.

Размеры перевозок на проектируемой линии:

в прямом, грузовом, направлении (в направлении А–Б) при движении «туда» $\Gamma_{\text{туда}} = 7,8$ млн т/год, доля общего грузопотока, подвергаемая перелому массы составов в направлении движения «туда», $\alpha_{\text{пер(туда)}} = 1,0$, т.е. весь грузопоток прямого направления подвергается перелому массы грузовых составов;

в обратном, негрузовом, направлении (в направлении Б–А) при движении «обратно» $\Gamma_{\text{обратно}} = 5,0$ млн т/год, доля общего грузопотока, подвергаемая перелому массы составов в направлении движения «обратно», $\alpha_{\text{пер(обратно)}} = 1,0$, т.е. весь грузопоток обратного направления подвергается перелому массы грузовых составов.

Перелом массы грузового поезда происходит на станции примыкания, условно говоря, на станции Узловой (рис. 1):

в прямом, грузовом, направлении (направлении А–Б) при движении «туда» происходит перелом массы в сторону уменьшения массы грузового поезда;

в обратном, негрузовом, направлении (направлении Б–А) при движении «обратно» происходит перелом массы в сторону увеличения массы грузового поезда.

Если весовая норма поезда уменьшается, то маршрут формируют из двух групп — ядра и пополнения. Ядро соответствует новой уменьшенной норме и следует после отцепки пополнения без переформирования. Если весовая норма поезда увеличивается на станции перелома, состав пополняют вагонами того же назначения, а при их отсутствии — вагонами, следующими до одной из попутных станций, где маршрут пополняют вагонами, соответствующими назначению ядра состава. В некоторых случаях при переломе массы поезда в сторону увеличения некоторые маршруты могут задерживаться для разделения на части и включения этих частей в другие составы — с целью пополнения их до установленной весовой нормы поезда.

Следовательно, при различных весовых нормах поездов по участкам в пути следования маршрутов возможно изменение массы или длины состава. В таких случаях отправительский маршрут является ядром состава, которое может на отдельных участках дополняться до весовой нормы поезда вагонами других назначений. При этом важно, чтобы простои вагонов при прицепке и отцепке групп были минимальными, а использование тяговых средств — наилучшим. Эффективность маршрутизации вагонопотоков необходимо рассматривать в связи с возможностью формирования других категорий поездов (сквозных, участковых и сборных) так, чтобы на станциях зарождения и пе-

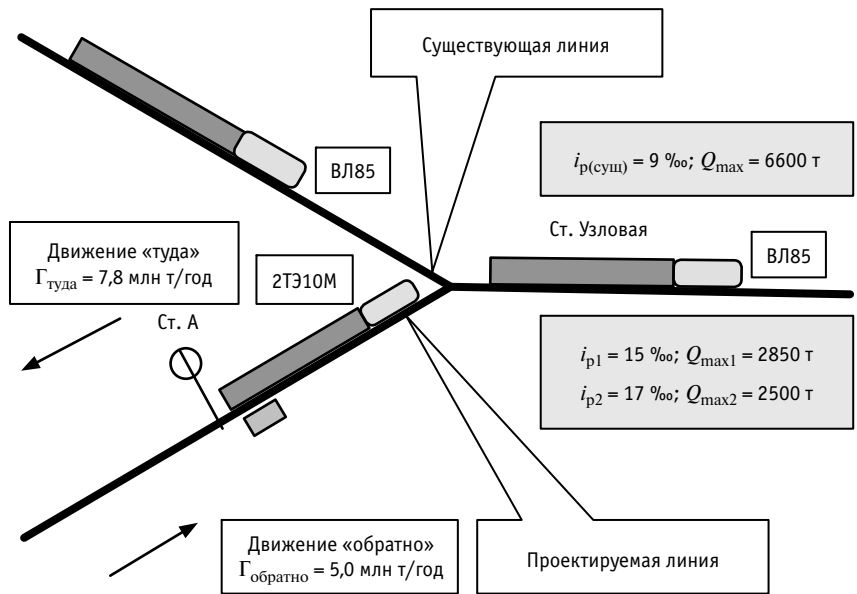


Рис. 1. Схема к расчету дополнительных эксплуатационных расходов при переломе с уменьшением и увеличением массы состава

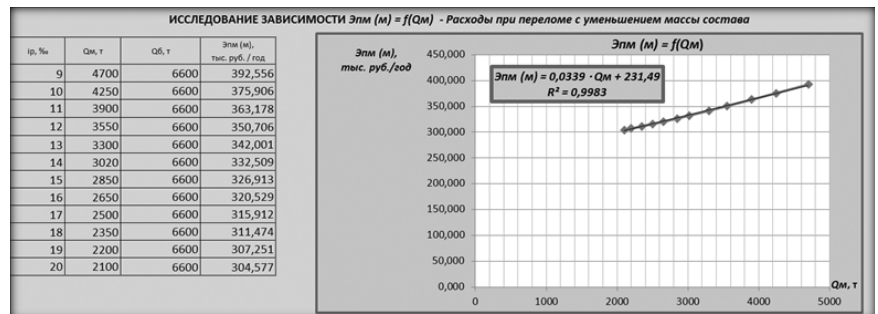


Рис. 2. Скриншот программы PERELOM_MASSY_POEZDA.xlsx, линейная аппроксимация зависимости $\Theta_{\text{пм(м)}} = f(Q_m)$

реработки вагонопотоков суммарные расходы были минимальны [6].

С использованием формул (3) и (4) для расчета эксплуатационных расходов при переломе с уменьшением и с увеличением массы состава при движении поездов в прямом (грузовом) и обратном (негрузовом) направлениях составлена таблица в MS Excel, которая вошла как область расчета в программу PERELOM_MASSY_POEZDA.xlsx.

Построены графики зависимостей $\Theta_{\text{пм(м)}} = f(Q_m)$, $\Theta_{\text{пм(б)}} = f(Q_m)$ после чего выполнена линейная аппроксимация.

Для графика $\Theta_{\text{пм(м)}} = f(Q_m)$ получена аппроксимирующая функция $\Theta_{\text{пм(м)}} = 0,0339 \cdot Q_m + 231,49$ при коэффициенте детерминации, равном $R^2 = 0,9983$ (рис. 2).

Для графика $\Theta_{\text{пм(б)}} = f(Q_m)$ получена аппроксимирующая функция $\Theta_{\text{пм(б)}} = 0,0517 \cdot Q_m + 97,54$ при коэффициенте детерминации, равном $R^2 = 0,9997$ (рис. 3).

После анализа полученных функций сделан вывод, что зависимости $\Theta_{\text{пм(м)}}$ и $\Theta_{\text{пм(б)}}$ от Q_m линейные, прямо пропорциональные, т.е. чем меньше величина Q_m , тем меньше оба слагаемых дополнительных эксплуатационных расходов $\Theta_{\text{пм(м)}}$ и $\Theta_{\text{пм(б)}}$.

Об этом же говорится в работе К. К. Тихонова [6]: «Таким образом, годовые затраты на перелом веса пропорциональны числу пополняемых или формируемых из отцепленных групп назначений, величине грузопотока и меньшему весу поездов» (курсив авторов статьи).

Соответственно на первый вопрос следует ответить так: при увеличении разности между Q_M и Q_6 на станции Узловой расходы по перелому массы составов действительно уменьшаются, ошибки нет.

Исследование по второму вопросу

Общие затраты в пункте перелома массы составов для каждого из направлений (туда/обратно) $\mathcal{E}_{об}$ ранее предлагалось определять по формуле (5). При этом не уточнялось, сколько дополнительных станционных путей сооружается на станции перелома массы по каждому из направлений перевозок.

Авторам удалось найти ответ на данный вопрос, изучив работы К. К. Тихонова [6, 7]. Так, в работе [6] прямо утверждается, что «необходимо уложить столько дополнительных станционных путей, сколько назначений транзитных поездов по плану формирования подвергаются перелому, и дополнительно к этому еще два пути: вытяжной и отправочный».

Следовательно, на узловой станции перелома массы состава для каждого направления необходимо предусматривать четыре дополнительных станционных пути, формулу (5) необходимо уточнить и вычисления производить по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{об} = 20 + 4 \cdot 22,48 \cdot l_{ст}. \quad (7)$$

Кроме того, при расчете $l_{ст}$ по формуле (6) полезную длину приемоотправочных путей необходимо принимать по той величине, которая принята на узловой станции, т.е. в рассматриваемом примере $l_{поп} = 1050 \text{ м} = 1,05 \text{ км}$.

Таким образом, на второй вопрос, поставленный в статье, необходимо ответить так: при расчете следует использовать формулу (7).

Данное уточнение оказывает большое влияние на правильное формирование этапов жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути [8].

Исследование по третьему вопросу

В работе К. К. Тихонова [7] говорится о том, что дополнительные эксплуатационные расходы из-за изменения составов транзитных порожних поездов в одну сторону движения следует определять по зависимости вида

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{пм(пор)} = & \mathcal{E}_{нак(пор)} + \\ & + \mathcal{E}_{тр(пор)} + \mathcal{E}_{расф(форм)(пор)} + \\ & + \mathcal{E}_{ман(пор)} + \mathcal{E}_{путь(пор)}, \end{aligned} \quad (8)$$

однако примеров решения подобной задачи не приводится.

В качестве ответа на третий вопрос необходимо сказать следующее: действительно, при изменении полезной длины приемоотправочных путей на линии примыкания необходимо учитывать дополнительные эксплуатационные расходы, которые могут рассчитываться по

формуле (8). При этом следует уточнить саму методику расчета слагаемых в формуле (8).

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ ПО ПЕРЕЛОМУ МАССЫ СОСТАВА PERELOM_MASSY_POEZDA.XLSX

Для повышения эффективности расчетов дополнительных эксплуатационных расходов при переломе массы состава была разработана программа PERELOM_MASSY_POEZDA.xlsx. Общий вид рабочего листа программы представлен на рис. 4.

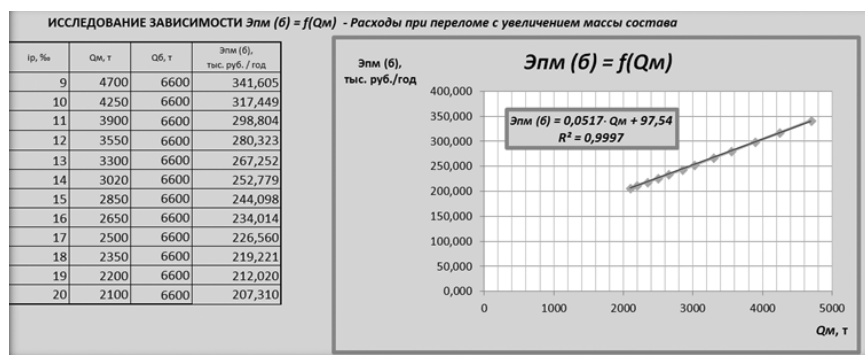


Рис. 3. Скриншот программы PERELOM_MASSY_POEZDA.xlsx, линейная аппроксимация зависимости $\mathcal{E}_{пм(б)} = f(Q_M)$

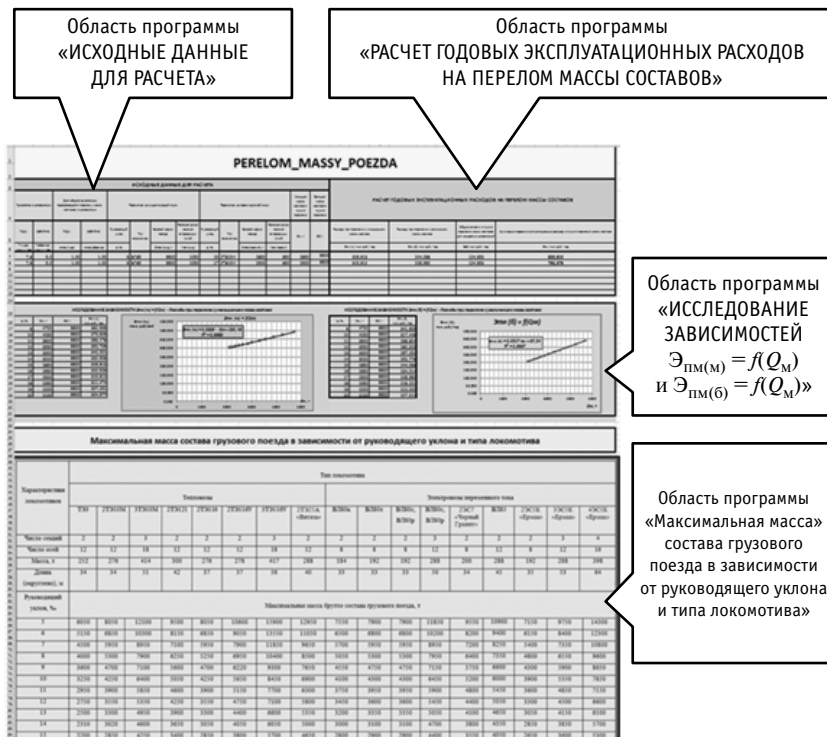


Рис. 4. Скриншот программы PERELOM_MASSY_POEZDA.xlsx

Область программы «Исходные данные для расчета» показана на рис. 5: все данные должны быть введены пользователем по строкам, в которых размещаются данные по вариантам трассы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА																	
Группы и направления				Данная область маршрута, подлежащая перелому массы состава, в направлении						Параметры на существующей линии				Параметры на проектируемой линии		Меньшая масса состава в пункте перелома	Большая масса состава в пункте перелома
Туда	Обратно	Туда	Обратно	Руководящий уклон	Тип колеи/метра	Весовая норма поезда	Полная длина времени отправления поезда	Руководящий уклон	Тип колеи/метра	Весовая норма поезда	Полная длина времени отправления поезда	См, т	Об, т				
Г (руки, дни, т/год)	Обратно, дни, т/год	км/ч (руки)	км/ч (обратно)	‰, %	9/18/185	6600	1050	‰, %	9/18/185	6600	1050	2500	850				
7,8	5,0	1,00	1,00	9/18/185	6600	1050	15	21310М	2850	850	2500	2850	6600				
7,8	5,0	1,00	1,00	9/18/185	6600	1050	17	21310М	2500	850	2500	2500	6600				

Рис. 5. Скриншот области «Исходные данные для расчета» программы PERELOM_MASSY_POEZDA.xlsx

Основной расчет по вариантам трассы выполняется в области программы «Расчет годовых эксплуатационных расходов на перелом массы составов».

Результаты расчетов годовых эксплуатационных расходов по перелому массы состава по вариантам трассы в ценах IV квартала 2020 г. при $Q_6 = 6600$ т на существующей линии с электрической тягой ВЛ85, к которой примыкает проектируемая линия с тепловозной тягой 2ТЭ10М, приведены ниже.

По первому варианту трассы с $i_{p1} = 15\%$ и $Q_{M(1)} = 2850$ т расходы составили $\mathcal{E}_{ПМ(1)} = 820,916$ тыс. руб./год. По второму варианту трассы с $i_{p2} = 17\%$ и $Q_{M(2)} = 2500$ т расходы составили $\mathcal{E}_{ПМ(2)} = 792,378$ тыс. руб./год.

То есть это еще раз подтверждает полученный вывод по первому вопросу исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены ответы на три вопроса, сформулированные в исследовании:

при увеличении разности между Q_M и Q_6 на узловой станции расходы по перелому массы составов уменьшаются, так как прямо пропорционально зависят от величины Q_M ;

на узловой станции для каждого направления необходимо предусматривать четыре дополнительных станционных пути и вычисления производить по формуле (7);

при изменении полезной длины приемоотправочных путей на линии примыкания требуется учитывать дополнительные эксплуатационные расходы, которые можно рассчитывать по формуле (8).

2. Разработана программа расчета эксплуатационных расходов по перелому массы состава PERELOM_MASSY_POEZDA.xlsx.

Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р. URL: <http://ppt.ru/news/56963> (дата обращения: 23.12.2020).
2. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р (в редакции распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.06.2014 г. № 1032-р). URL: <http://rosavtdor.ru/storage/b/2014/03/23/strategia.pdf> (дата обращения: 23.12.2020).
3. Проблемы и перспективы строительства линии Кызыл — Курагино / В. А. Подвербный, В. А. Курочкин, И. В. Благоразумов [и др.] // Безопасность регионов — основа устойчивого развития : материалы четвертой международной научно-практической конференции. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2014. С. 305–321.
4. Предпроектные соображения по строительству железнодорожного пути по направлению «Окино-Ключевское месторождение угля — Гусинозерская ГРЭС» / И. В. Благоразумов, К. А. Кирпичников, Е. В. Непомнящих [и др.] // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сборник научных трудов / Под ред. В. С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. Вып. 1. С. 39–42.
5. Определение эксплуатационных расходов и капитальных вложений в подвижной состав при проектировании железных дорог : методические указания к курсовому и дипломному проектированию / Сост. Б. И. Гороховцев, Е. А. Макушкина. Москва : МИИТ, 1986. 43 с.
6. Тихонов К. К. Техничко-экономические расчеты в эксплуатации железных дорог. Москва : Транспорт, 1962. 213 с.
7. Тихонов К. К. Выбор оптимальных параметров эксплуатации железных дорог. Москва : Транспорт, 1974. 138 с.
8. Ковенькин Д. А., Подвербный В. А. Этапы жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сборник научных трудов / Под ред. В. С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. Вып. 3. С. 151–157.

References

1. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation up to 2030 [Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 17.08.2017 No. 877-r. URL: <http://ppt.ru/news/56963> (access date: 23.12.2020).
2. The Russian Federation transport strategy for the period up to 2030 [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 22.11.2008 No. 1734-r (in edition from 11.06.2014 No. 1032-r). URL: <http://rosavtdor.ru/storage/b/2014/03/23/strategia.pdf> (access date: 23.12.2020).
3. Problems and prospects of construction of the Kyzyl — Kuragino line [Problemy i perspektivy stroitel'stva linii Kyzyl — Kuragino] / V. A. Podverbnyy, V. A. Kurochkin, I. V. Blagorazumov [et al.] // Security of regions — basis of sustainable development : proceedings of the 4th International research and practice conference. Irkutsk : Publishing House of ISTU, 2014. Pp. 305–321.
4. Pre-project considerations on construction of railway track on the «Okinoklyuchevskoe coal deposit — The Gusinozerskaya State District Power Station» [Predproektnye soobrazheniya po stroitel'stvu zheleznodorozhnogo puti po napravleniyu «Okinoklyuchevskoe mestorozhdenie uglya — Gusinozerskaya GRES»] / I. V. Blagorazumov, K. A. Kirpichnikov, E. V. Nepomyashhikh [et al.] // Designing of development of regional railway network : collection of scientific papers / Ed. by V. S. Shvartsfeld. Khabarovsk : Publishing House of FESTU, 2013. Issue 1. Pp. 39–42.
5. Determination of operational costs and investments in rolling stock at designing of railways [Opredelenie ekspluatatsionnykh raskhodov i kapital'nykh vlozheniy v podvizhnoy sostav pri proektirovanii zheleznnykh dorog] : guidelines to term and diploma design works / Compositors: B. I. Gorokhovtsev, E. A. Makushkina. Moscow : MIIT, 1986. 43 p.
6. Tikhonov K. K. Technical and economic calculations in the operation of railways [Tekhniko-ekonomicheskiye raschety v ekspluatatsii zheleznnykh dorog]. Moscow : Transport, 1962. 213 p.
7. Tikhonov K. K. The choice of optimal parameters of railway operation [Vybor optimal'nykh parametrov ekspluatatsii zheleznnykh dorog]. Moscow : Transport, 1974. 138 p.
8. Kovenkin D. A., Podverbnyy V. A. Stages of life cycle of railway track [Etapy zhiznennogo tsikla verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti] // Designing of development of regional railway network : collection of scientific papers / Ed. by V. S. Shvartsfeld. Khabarovsk : Publishing House of FESTU, 2015. Issue 3. Pp. 151–157.

УДК 625.172

Татьяна Николаевна Асалханова, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,
Андрей Александрович Осколков, начальник сектора информатизации Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры, Иркутск, Россия

ОРГАНИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПУТЕВЫХ РАБОТ С УЧЕТОМ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Tatyana Nikolaevna Asalkhanova, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Track and Track Facilities Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia,
Andrey Alexandrovich Oskolkov, Head of Informatization Sector of the East Siberian Directorate of Infrastructure, Irkutsk, Russia

Organization of transport production of permanent way work with the consideration for information modeling

Аннотация

Долгосрочной программой ОАО «РЖД» до 2025 г. предусмотрена цифровая трансформация железнодорожного транспорта. Особое внимание уделено информационным и цифровым технологиям моделирования опережающего развития инфраструктуры для обеспечения возрастающих объемов перевозок, повышения производственной эффективности, обеспечения ожидаемого результата безопасности движения и экономики отрасли в целом.

В статье представлен макет информационной модели управления инфраструктурой в рамках внедрения системы АСУ ВИМ РЖД на примере организации транспортного производства путевых работ.

Ключевые слова: ВИМ, информационная модель инфраструктуры, путевое хозяйство, объекты инфраструктуры, технологии информационного моделирования, транспортное производство, цифровые технологии.

Summary

The JSC «RZD» Long-term program up to 2025 envisages a digital transformation of railway transport. It dedicates a special attention to information and digital technologies of modeling advanced development of infrastructure for provision of growing traffic, increase of production efficiency, provision of expected result of traffic safety and industry economics in whole.

The paper presents a design of the information model for infrastructure control within the framework of introduction of the BIM RZD Automated Control System on the example of organization of transport production of permanent way work.

Keywords: BIM, information model of infrastructure, track facilities, infrastructure objects, technology of information modeling, transport production, digital technologies.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-65-67

Инфраструктура играет огромную роль в стратегии развития железнодорожного транспорта. В долгосрочной программе ОАО «РЖД» до 2025 г. поставлены общекорпоративные задачи, одной из которых является проект по моделированию опережающего развития инфраструктуры для обеспечения объемов перевозок, повышения производственной эффективности, достижения ожидаемого уровня безопасности движения и экономики отрасли в целом [1].

Для решения поставленной задачи в 2020 г. в компании разработана и утверждена дорожная карта научно-технического сопровождения системы управления объектами капитального строительства с использованием технологии информационного моделирования (ВИМ-технологии). Дорожная карта позволяет определить этапы работ по внедрению этой технологии до 2030 г., включая создание АСУ ВИМ РЖД и переход на умную эксплуатацию инфраструктуры [2, 3].

В настоящее время научными обоснованиями в области ВИМ-технологий на железнодорожном транспорте нашей страны занимаются ученые практически всех университетов путей сообщения и специалисты ОАО «РЖД». Внедрение ВИМ-технологии даст возможность перейти к цифровому управлению объектами инфраструктуры на всех этапах жизненного цикла, обеспечить автоматизированный обмен информацией между всеми участниками процесса и органами власти, повысить качество управленческих решений, эффективность строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры [3].

Однако предлагаемые проекты направлены в первую очередь на развитие строительного комплекса инфраструктуры холдинга, а по информационному моделированию текущего содержания железнодорожного пути разработок пока нет.

Создание ВИМ-технологии для текущего содержания железнодорожного пути обусловлено внутренними потребностями путевого хозяйства. Внедрение таких технологий в технологическое производство путевого хозяйства должно быть

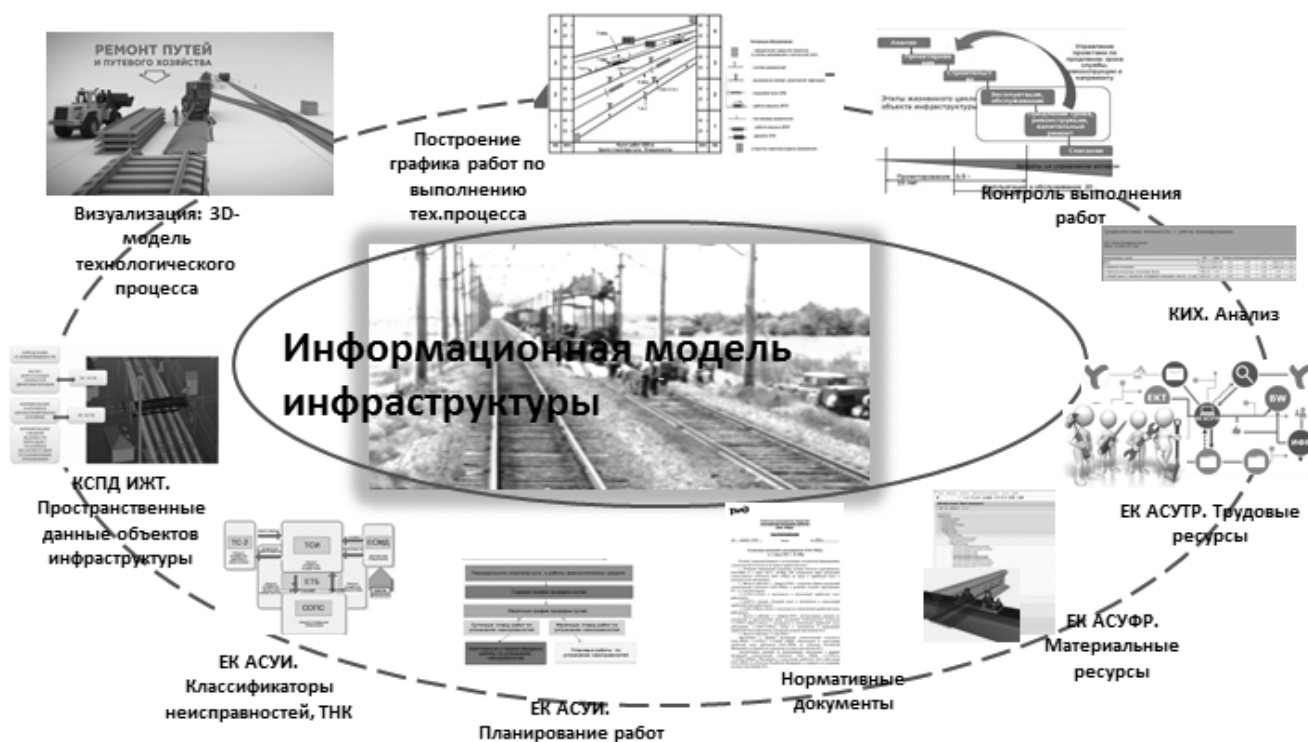


Рис. 1. Макет информационной модели управления инфраструктурой

направлено на повышение производительности труда, установление взаимосвязи между всеми элементами железнодорожной инфраструктуры, на эффективное использование механизмов, оборудования, путевых машин, материальных и трудовых ресурсов, повышение качества мониторинга и диагностики неисправностей подвижного состава и железнодорожного пути, на снижение стоимости жизненного цикла содержания объектов инфраструктуры.

На наш взгляд, для построения информационной модели управления эксплуатацией инфраструктуры и включения в АСУ ВМ РЖД уже имеются все предпосылки. В различных корпоративных информационных системах управления (ЕК АСУИ, ЕК АСУФР, ЕК АСУТР, КСПД ИЖТ и др.) накоплены огромные массивы данных, которые могут стать основой внедрения цифровых технологий, таких как BIG Data, предиктивная аналитика, BIM-моделирование [4, 5]. Цифровые технологии позволяют осуществлять контроль и анализ работы и состояния железной дороги в реальном времени, управлять всей системой инфраструктуры удаленно, предоставлять своевременные отчеты о текущих неисправностях пути [6]. В свою очередь, предиктивная (предсказательная) аналитика формирует справочники, аналитические материалы для информационной модели управления текущим содержанием объектов инфраструктуры.

Для того чтобы в такую модель управления не интегрировать из систем ЕК АСУИ (единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой) классификаторы видов неисправностей, технологико-нормировочные карты (ТНК), классификатор соответствия видов неисправностей

ТНК, в АСУ ВМ РЖД должен быть предусмотрен модуль взаимодействия с системами ЕК АСУИ — ЕТБ (единая технологическая база), ТС-2 (текущее содержание пути), ЕСМД (единая система мониторинга и диагностики) и другими проектами ЕК АСУИ.

Предиктивная аналитика, выполняемая на основе данных из систем ЕК АСУИ, ЕК АСУФР, ЕК АСУТР, позволит проводить в АСУ ВМ РЖД расчетный анализ текущего состояния железнодорожного пути, автоматически выбирать оптимальный технологический процесс с учетом материальных и трудовых ресурсов, наличия путевых машин, а также состояния других объектов инфраструктуры (сигнализации, централизации и блокировки, электрификации и т. п.), в том числе в период технологического «окна»; визуализировать и моделировать технологическое производство и автоматически строить график выполнения работ. Кроме того, после выполнения путевых работ можно будет сравнить модели до момента производства и после (в частности, используя цифрового двойника), чтобы получить полноформатную картину соблюдения технологического процесса. Предлагаемый авторами статьи макет подобной информационной модели показан на рис. 1.

Анализ международного опыта использования BIM для объектов транспортной (железнодорожной) инфраструктуры показал, что при создании информационной модели необходимо учитывать много факторов, в том числе особенности форматов передачи данных из разных систем, наличие 3D-моделей активов инфраструктуры, нормативных документов, программного обеспечения. Например, программный продукт Assets4Rail (Евросоюз) стремится внедрить двойной подход при создании информационной модели, включая инфраструктуру (тоннели,

мости, геометрию путей и системы безопасности) и транспортные средства. Выделенная информационная модель с интегрированными алгоритмами должна аккумулировать и анализировать информацию, собранную специальными датчиками, которые будут отслеживать дефекты подземных тоннелей, накопление усталостных дефектов конструкций, шум и вибрации мостов, а также геометрию пути [7].

Одна из особенностей эксплуатации российских железных дорог состоит в соблюдении эксплуатационных показателей и для железных дорог, и для их определенных участков, а также в обеспечении безопасных условий перевозок, за которые отвечают разные хозяйства — дирекция движения, дирекция инфраструктуры, дирекция по ремонту пути и т. д. Каждое хозяйство старается выполнить поставленные задачи и достичь запланированных показателей, но возникают конфликты ин-

тересов, особенно если это касается предоставления технологических «окон» для транспортного производства работ по текущему содержанию инфраструктуры или по ремонту ее объектов. Возможно, разрешением конфликтов как раз и станет разработка единых требований к построению информационных моделей, визуализации информационной модели инфраструктуры (в том числе 4D/5D/6D), которая является компонентом BIM-технологий, и к взаимодействию всех участников транспортного производства [8, 9].

Таким образом, разработка и внедрение в АСУ BIM РЖД модуля информационной модели инфраструктуры — это насущная и необходимая для путевого хозяйства и для других хозяйств, обслуживающих объекты инфраструктуры холдинга и осуществляющих перевозки в условиях постоянного роста грузопотока, задача.

Литература

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г. № 466-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgy07PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 12.12.2020).
2. Бек Т. BIM обоснуют научно // Гудок. 2020. 17 фев. С. 2.
3. Кадик Л. В РЖД откроется центр компетенций в области BIM-технологий. URL: <https://gudok.ru/content/infrastructure/1480403/> (дата обращения: 12.12.2020).
4. Асалханова Т. Н., Ефремова А. А., Осколков А. А. Предпосылки к внедрению цифровых технологий на дистанциях пути // Молодая наука Сибири. 2020. № 3 (9). С. 1–7. ISSN 2658–610X.
5. Локтева В. А., Шукуров Д. Р., Локтев А. А. Возможности BIM-технологий для объектов транспортной инфраструктуры на разных этапах жизненного цикла // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2020. № 16. С. 49–60.
6. Поздеева А. Ю., Пиотрович А. А. Проблемное поле в области изучения концепции цифровизации инфраструктуры железных дорог России // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2019. Т. 1. С. 228–233.
7. Куприяновский В. П., Казаринов А. В., Талапов В. В. Некоторый анализ международного опыта использования BIM для объектов транспортной (железнодорожной) инфраструктуры. URL: <https://ardexpert.ru/article/19578> (дата обращения: 12.12.2020).
8. Колосова Е. BIM-технология для создания объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. URL: <https://www.tbforum.ru/blog/bim-tekhnologiya-dlya-sozdaniya-obyektov-infrast-ruktury-zheleznodorozhnogo-transporta> (дата обращения: 12.12.2020).
9. Разработка систем информационного моделирования для управления объектами инфраструктуры железнодорожного транспорта на протяжении жизненного цикла / В. Н. Дмитриев, О. В. Дружинина, А. А. Локтев, Т. Н. Шеронова // Транспорт: наука, техника, управление. 2020. № 10. С. 20–26. ISSN 0236–1914.

References

1. Long-term Development Program of JSC Russian Railways up to 2025 [Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshhestva «Rossiyskie zheleznye dorogi» do 2025 goda]: approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 19.03.2019 No. 466-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgy07PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (access date: 12.12.2020).
2. Bek T. The BIM will be substantiated scientifically [BIM obosnuyt nauchno] // Gudok. 2020. February 17. P. 2.
3. Kadik L. The JSC «RZD» opens a competence centre in sphere of the BIM technologies [V RZhD otkroetsya tsentr kompetentsiy v oblasti BIM-tekhnologiy]. URL: <https://gudok.ru/content/infrastructure/1480403/> (access date: 12.12.2020).
4. Asalkhanova T. N., Efremova A. A., Oskolkov A. A. Prerequisites for the introduction of digital technologies in path organizations [Predposylki k vnedreniyu tsifrovyykh tekhnologiy na distantsiyakh puti] // Young Science of Siberia. 2020. No. 3 (9). Pp. 1–7. ISSN 2658-610X.
5. Lokteva V. A., Shukurov D. R., Loktev A. A. Opportunities of BIM technologies for transport infrastructure objects at different stages of the life cycle [Vozmozhnosti BIM-tekhnologiy dlya ob'ektov transportnoy infrastruktury na raznykh etapakh zhiznennogo tsikla] // Introduction of modern constructions and advanced technologies to track facilities. 2020. No. 16. Pp. 49–60.
6. Pozdeeva A. Yu., Piotrovich A. A. Problem field in the field of studying the concept of the infrastructure`s digitalization of Russian railways [Problemnoe pole v oblasti izucheniya kontseptsii tsifrovizatsii infrastruktury zheleznykh dorog Rossii] // Scientific, technical and economical collaboration of the ATR countries in the XXI century. 2019. Vol. 1. Pp. 228–233.
7. Kupriyanovskiy V. P., Kazarinov A. V., Talapov V. V. Slight analysis of international experience of using the BIM for objects of transport (railway) infrastructure [Nekotoryy analiz mezhdunarodnogo opyta ispol'zovaniya BIM dlya ob'ektov transportnoy (zheleznodorozhnoy) infrastruktury]. URL: <https://ardexpert.ru/article/19578> (access date: 12.12.2020).
8. Kolosova E. The BIM technology for creation of objects of railway transport infrastructure [BIM-tekhnologiya dlya sozdaniya ob'ektov infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta]. URL: <https://www.tbforum.ru/blog/bim-tekhnologiya-dlya-sozdaniya-obyektov-infrast-ruktury-zheleznodorozhnogo-transporta> (access date: 12.12.2020).
9. Development of information modelling systems for managing railway infrastructure facilities during their life cycle [Razrabotka sistem informatsionnogo modelirovaniya dlya upravleniya ob'ektami infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta na protyazhenii zhiznennogo tsikla] / V. N. Dmitriev, O. V. Druzhinina, A. A. Loktev, T. N. Sheronova // Transport: science, equipment, management. 2020. No. 10. Pp. 20–26. ISSN 0236-1914.

УДК 624.21

Ярослав Алексеевич Швец, преподаватель кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,
Александр Юрьевич Журавлев, преподаватель кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия

ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬ СТОЛБЧАТЫХ ОПОР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ, ЗАПРОЕКТИРОВАННЫХ ПО ПРИНЦИПУ I НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Yaroslav Alexeevich Shvets, Lecturer, Bridges, Tunnels and Underground Constructions Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Alexander Yuryevich Zhuravlev, Lecturer, Bridges, Tunnels and Underground Constructions Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia

Carrying load of column poles of railway bridges that are designed according the I-st principle on permafrost ground

Аннотация

В статье приведены результаты по разработке методики определения грузоподъемности столбчатых опор железнодорожных мостов, опирающихся на многолетнемерзлые грунты основания и запроектированных по принципу I. Показана необходимость использования методов математического моделирования для определения теплового режима мерзлых грунтов в основании искусственных сооружений, что позволит прогнозировать грузоподъемность опор мостов на любой срок эксплуатации. Представлен алгоритм расчета и прогноза грузоподъемности мостовых опор при деградации в их основании многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: малые и средние мосты, грузоподъемность, многолетнемерзлые грунты.

Summary

The paper presents results of development of a method for determination of carrying load of column poles of railway bridges that are based on permafrost ground and designed according the I-st principle. It also shows the necessity to use methods of mathematical modeling for determination of thermal mode of permafrost ground in the foundation of artificial constructions, which will allow forecasting the carrying load of bridge poles for any term of operation. As a result, the paper shows an algorithm for calculation and forecasting of carrying load of bridge poles at degradation of permafrost in their foundation.

Keywords: short and average bridges, carrying load, permafrost ground.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-68-74

Дальневосточная железная дорога (ДВЖД) — одна из крупнейших на сети железных дорог России, включающая участки от станции Архара до станции Владивосток (Транссибирское направление) и Байкало-Амурскую магистраль. Железная дорога проходит по районам как с умеренными, так и с суровыми климатическими условиями.

Участки, расположенные в северной строительно-климатической зоне (ССКЗ), характеризуются наличием многолетнемерзлых грунтов (ММГ) островного и сплошного распространения. Здесь эксплуатируется значительное количество балочных мостов с опорами безростверкового типа на буропускных столбах. Такие опоры были запроектированы по современным нормам под перспективную расчетную временную нагрузку S14. Фактический срок их службы составляет 35–40 лет. В идеале состояние эксплуатируемых опор должно быть далеко от исчерпания технического ресурса. Однако по результатам обследований безростверковых мостовых опор на столбах установлено значительное число отклонений от допускаемых показателей нормальной эксплуатации, что главным образом связано с изменением параметров многолетнемерзлых грунтов оснований (таких как несущая способность, деформационные свойства, глубина оттаивания и др.) в зоне эксплуатируемых мостов.

Основная задача расчета грузоподъемности опор мостов методом классификации, предлагаемым в действующем руководстве [1], состоит в установлении возможности безопасного и бесперебойного пропуска по мосту классифицируемых временных поездных нагрузок с учетом фактического состояния опор, а для мостов, эксплуатируемых в ССКЗ, также с учетом изменения теплового режима мерзлоты в их основании. Однако в руководстве [1] представлена методика расчета только массивных опор с фундаментами на естественном основании и свайных опор в качестве условных массивных.

В связи с этим возникает необходимость в разработке методики определения грузоподъемности опор безростверкового типа на столбах, опирающихся на многолетнемерзлые грунты основания и запроектированных по принципу I. Кроме того, одной из важнейших задач является также прогнозирование грузоподъемности опор с использованием теплотехнических моделей мостовых переходов для определения температурного режима многолетнемерзлых оснований на любой период эксплуатации.

Расчет столбов безростверковой опоры при проверке их несущей способности по грунту при использовании многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований производится согласно [2] по первой группе предельных состояний исходя из условия:

$$F \leq \frac{F_u}{\gamma_n}, \quad (1)$$

где F — расчетная вертикальная нагрузка на основание, кН;
 F_u — несущая способность основания, кН;
 γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружения (для мостов $\gamma_n = 1,4$).

Для вертикально нагруженной столбчатой опоры при неоднородных по составу многолетнемерзлых грунтах несущая способность определяется, как для висячей сваи, по формуле

$$F_u = \gamma_t \gamma_c \left(RA + \sum_{j=1}^n R_{aff} A_{aff} \right), \quad (2)$$

где γ_t — коэффициент, учитывающий изменение температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха (для мостов $\gamma_t = 1$);

γ_c — коэффициент условий работы основания (для мостов $\gamma_c = 1$);

R — расчетное давление на мерзлый грунт под подошвой столбчатой опоры, МПа;

A — площадь поперечного сечения подошвы столбчатой опоры, м²;

R_{aff} — расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания столбчатого фундамента в пределах j -го слоя грунта, МПа;

A_{aff} — площадь поверхности смерзания грунта с боковой поверхностью столба в пределах j -го слоя грунта, м²;

n — число слоев многолетнемерзлого грунта, выделенных при расчете.

В нормативной документации [2] расчетные прочностные параметры мерзлых грунтов представлены в виде зависимостей от температуры грунта. Очевидно, что расчетные давления под подошвой столбчатого фундамента (рис. 1) и расчетные сопротивления грунтов сдвигу по поверхности смерзания (рис. 2) уменьшаются с повышением температуры мерзлого грунта.

На рис. 1 и 2 выделены три зоны, характеризующие изменение расчетных параметров от температуры мерзлого грунта: зона 1 — диапазон температур от -10 до -4 °С (низкотемпературная многолетняя мерзлота);

зона 2 — диапазон температур от -4 до -1 °С (низкотемпературная многолетняя мерзлота);

зона 3 — диапазон температур от -1 °С до температуры начала замерзания (высокотемпературная многолетняя мерзлота).

Зависимости расчетных давлений под подошвой столбчатого фундамента и расчетных сопротивлений по боковой поверхности смерзания в зоне 1 и зоне 2 описываются линейным законом. При этом в зоне 2 угол наклона несколько круче, чем в зоне 1, что говорит об увеличении скорости снижения расчетных параметров мерзлых грунтов при росте их температуры. Зависимости расчетных параметров от температуры грунта в зоне 3 описываются нелинейным законом: характерно резкое снижение расчетного давления (сопротивления) при приближении к температуре начала замерзания и переходе грунта в пластичномерзлое состояние.

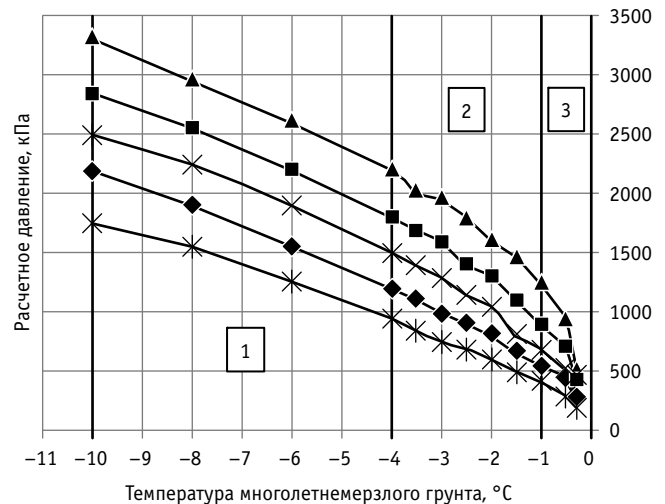


Рис. 1. Расчетные давления на мерзлые незасоленные грунты под подошвой столбчатого фундамента в зависимости от их температуры: —◆— суглинки и глины, $i < 0,2$; —■— пески мелкие и пылеватые, $i < 0,2$; —▲— к/о и пески среднетонкие и крупные, $i < 0,2$; —×— супеси, $i < 0,2$; —*— все виды грунтов, $i > 0,2$

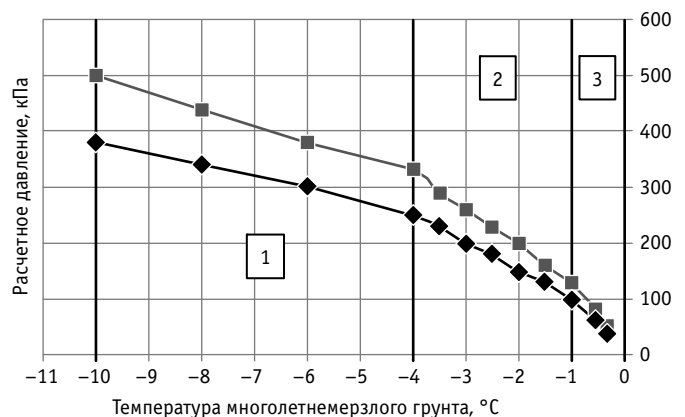


Рис. 2. Расчетные сопротивления мерзлых незасоленных грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхности смерзания в зависимости от их температуры: —◆— глинистые; —■— песчаные

Таким образом, для оснований сооружений, эксплуатируемых в районах распространения высокотемпературной многолетней мерзлоты ($-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше), скорость снижения расчетных прочностных параметров грунтов наиболее высока и зависимость от температуры определяется нелинейным законом. Отсюда следует, что грузоподъемность сооружений транспорта (мостов) в значительной степени зависит от текущего теплового режима их многолетнемерзлых оснований.

При расчете столбчатого фундамента по несущей способности по грунту основания допускаемая временная нагрузка определяется из условия предельного состояния (1) с использованием уравнения (2) и может быть вычислена следующим образом:

$$k = \frac{\frac{1}{\gamma_n} \gamma_t \gamma_c (RA + \sum R_{aff} A_{aff}) - \sum N_n}{\varepsilon_k \gamma_{fk} \Omega_k^N}, \quad (3)$$

где ε_k — доля вертикальной нагрузки от подвижного состава, передающаяся на столб;

γ_{fk} — коэффициент надежности к временным нагрузкам;

Ω_k^N — площадь линии влияния усилий от временной нагрузки на столб, м;

$\sum N_n$ — усилие в столбе от суммы постоянных нагрузок, кН.

Следует отметить, что формула (3) позволяет определить допускаемую временную эквивалентную нагрузку для столбчатых опор, имеющих один ряд столбов в продольном направлении. При наличии двух и более рядов столбов расчет допускаемой временной нагрузки значительно усложняется. Это связано с необходимостью определять параметры линий влияния нормальной силы для каждого ряда столбов, чтобы находить максимальное нормальное усилие.

Построение линий влияния и вычисление внутренних усилий и реакций в столбах опор безростверкового типа предлагается производить по расчетной модели в пространственной постановке с учетом совместной работы плиты насадки, надземных и подземных частей сооружений, фундаментов и их оснований, т.е. так же, как для рамы, стойки которой жестко заделаны в твердомерзлый грунт или опираются на упругое основание (пластичномерзлые грунты). Такие расчеты целесообразно выполнять численными методами на ЭВМ при помощи апробированных программ, описывающих взаимодействие системы «сооружение — фундамент — грунтовое основание».

На данный момент задача по определению грузоподъемности сооружения может быть реализована прямым расчетом с использованием итераций, т.е. путем последовательных нагружений расчетной схемы опоры временной нагрузкой различной интенсивности (I, II, III и IV категории нагрузок) до выполнения условия (1). Однако решение такой задачи, во-первых, не соответствует принятому в нормативной документации методу классификаций, согласно которому необходимо определить собственно класс грузоподъемности элемента сооружения, а во-вторых, является достаточно трудоемким.

В нормативной литературе предусмотрены схемы нагружения концевых опор, характерные только для массивных устоев (рис. 3) [3]. Для определения грузоподъемности береговых

опор безростверкового типа на столбах требуется построение линий влияния нормальных сил для каждого ряда столбов, которые имеют различные конструктивные решения и условия загрузки, отличающиеся от представленных в нормах.

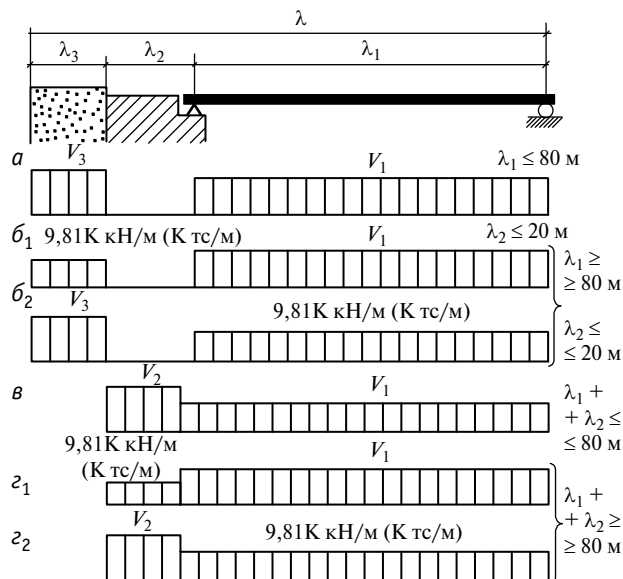


Рис. 3. Схема нагружения пролета одновременно с призой обрушения или пролета с устоем при расчете массивных устоев: V_1 , V_2 и V_3 — нормативная эквивалентная нагрузка для нагружения участков линий влияния λ_1 , λ_2 и λ_3 соответственно

Таким образом, очевидна необходимость расчетной методики определения грузоподъемности столбчатых опор мостов, эксплуатируемых на многолетнемерзлых основаниях и запроектированных по принципу I, с использованием численных методов моделирования. При этом возможна также и разработка методики прогноза грузоподъемности опор малых и средних мостов при изменении температурного режима многолетнемерзлых грунтов оснований в процессе эксплуатации.

Для реализации расчетной методики нами были использованы проектные данные (конструктивные решения опор, пролетных строений и устройств, инженерно-геологические и криологические условия), натурные наблюдения за тепловым режимом оснований многолетнемерзлых грунтов, исполнительная документация, сведения об обследованиях и наблюдениях, выполненных за время эксплуатации и включающих данные о деформациях и дефектах опор мостов. Данные были получены при анализе документации, имеющейся в мостоиспытательных и мерзлотных станциях, а также в проектных институтах, и при натурном обследовании объектов авторами статьи.

Тогда условие (1), применяемое для расчета столбов безростверковой опоры по несущей способности по грунту при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу I, можно представить в виде

$$\frac{1}{\gamma_n} (RA + \sum R_{aff} A_{aff} - \gamma_d F_{neg}) \geq \sum N_i^{\Pi} + \sum N_i^k + N_i^t. \quad (4)$$

Здесь F_{neg} — отрицательные (негативные) силы трения по боковой поверхности столбов, определяемые с учетом коэффициента γ_d [2], кН; $\sum N_i^{\Pi}$ — нормальное усилие в i -м столбе от суммы постоянных нагрузок (собственный вес пролетного строения и мостового полотна, передающийся на опорные площадки, собственный вес элементов устоя и засыпки, горизонтальное давление подходной насыпи), кН. При этом нормативное вертикальное давление от веса насыпанного на уступы опор и в пазухи устоев грунта $p_{\text{в}}$ принимается по формуле

$$p_{\text{в}} = \gamma h, \quad (5)$$

где γ — удельный вес грунта, кН/м³;

h — толщина засыпки, м,

а горизонтальное (боковое) давление от собственного веса грунта примыкающей к опоре насыпи определяется по формуле

$$p_n = \gamma h_x \tau_n, \quad (6)$$

где h_x — высота насыпи от подошвы рельса до рассматриваемого сечения, м;

τ_n — коэффициент нормативного бокового давления грунта засыпки береговых опор.

Нормальное усилие в i -м столбе от временной нагрузки интенсивностью k , используемое в формуле (4), определяется как

$$N_i^k = k \varepsilon_k \gamma_{fk} \omega_{k_i}^N, \quad (7)$$

где ε_k — доля временной нагрузки от подвижного состава, передающаяся на столб;

γ_{fk} — коэффициент надежности к временной вертикальной нагрузке, принимаемый в зависимости от длины загруженной линии влияния рассматриваемого i -го столба λ_i ;

$\omega_{k_i}^N$ — площадь линии влияния нормального усилия i -го столба устоя безростверкового типа (линия влияния строится с использованием численных методов расчета), м.

Нормальное усилие в i -м столбе от тормозной нагрузки T (принимается равной $0,1k\lambda_i$), используемое в формуле (4), можно представить в виде

$$N_i^t = 0,1a_i k \lambda_i \gamma_{ft}, \quad (8)$$

где a_i — параметр, определяемый как соотношение $N_i^{t, \text{ед}} / T$, здесь $N_i^{t, \text{ед}}$ — нормальное усилие в i -м столбе от тормозной нагрузки $T = 1$ (прикладывается в уровне подошвы рельса), определяемое численным методом (направление нагрузки задается согласно расчетному сочетанию усилий по табл. 1);

γ_{ft} — коэффициент надежности к временной горизонтальной нагрузке, принимаемый в зависимости от длины загрузки линии влияния рассматриваемого столба λ_i (см. табл. 1).

Интенсивность временной нагрузки классифицируемого подвижного состава k согласно формуле (3.1) руководства [1] можно представить в виде

$$k = K \cdot k_c (1 + \mu), \quad (9)$$

где K — класс i -го столба опоры;

k_c — эталонная временная вертикальная нагрузка от поезда по схеме С1, кН/м;

$(1 + \mu)$ — динамический коэффициент к нагрузкам от подвижного состава, принимаемый для фундаментов равным 1,0.

На основе формул (4)–(9) класс i -го ряда столбов устоя безростверкового типа по грузоподъемности из расчета по несущей способности по грунту может быть представлен в виде

$$K_i = \frac{1}{\gamma_n} \frac{(RA + \sum R_{aff} A_{aff} - \gamma_d F_{neg}) - \sum N_i^{\Pi}}{k_c (\varepsilon_k \gamma_{fk} \omega_{k_i}^N + 0,1a_i \lambda_i \gamma_{ft})}. \quad (10)$$

Для определения параметров линий влияния в столбах устоев используется моделирование в пространственной постановке численными методами (МКЭ). Формирование расчетной схемы и назначение граничных условий зависит от физического состояния мерзлых грунтов основания:

для твердомерзлых грунтов — расчетная схема в виде рамы, жестко заделанной в грунт (рис. 4а);

для пластичномерзлых грунтов — расчетная схема в виде рамы, стойки которой заделаны в упругое основание (рис. 4б).

Упругоподатливые связи, моделирующие основание, назначаются в зависимости от вида грунта (талый в пределах деятельного слоя или пластичномерзлый грунт), окружающего столбы. Соответствующие коэффициенты пропорциональности принимаются согласно табл. Е.1 [4].

Таблица 1

Расчетные сочетания нагрузок и коэффициенты надежности для определения грузоподъемности столбов устоя безростверкового типа

Нагрузки	Коэффициент надежности	Ряд столбов			
		Передний	Средний	Задний	
1. Постоянные нагрузки					
1.1. Собственный вес балок пролетных строений	1,1	+	+	+	
1.2. Собственный вес мостового полотна	1,3	+	+	+	
1.3. Собственный вес элементов устоя	1,1	+	+	+	
1.4. Горизонтальное давление насыпи на устой	1,4	+	+	+	
1.5. Вертикальное давление засыпки устоя	1,1	+	+	+	
2. Временные нагрузки					
2.1. Тормозная нагрузка	В зависимости от длины загрузки λ	+ ¹	–	+ ²	
	0				50
	1,2				1,1

Примечания: 1 — направление горизонтальной (тормозной) нагрузки «в пролет»; 2 — направление горизонтальной (тормозной) нагрузки «в насыпь».

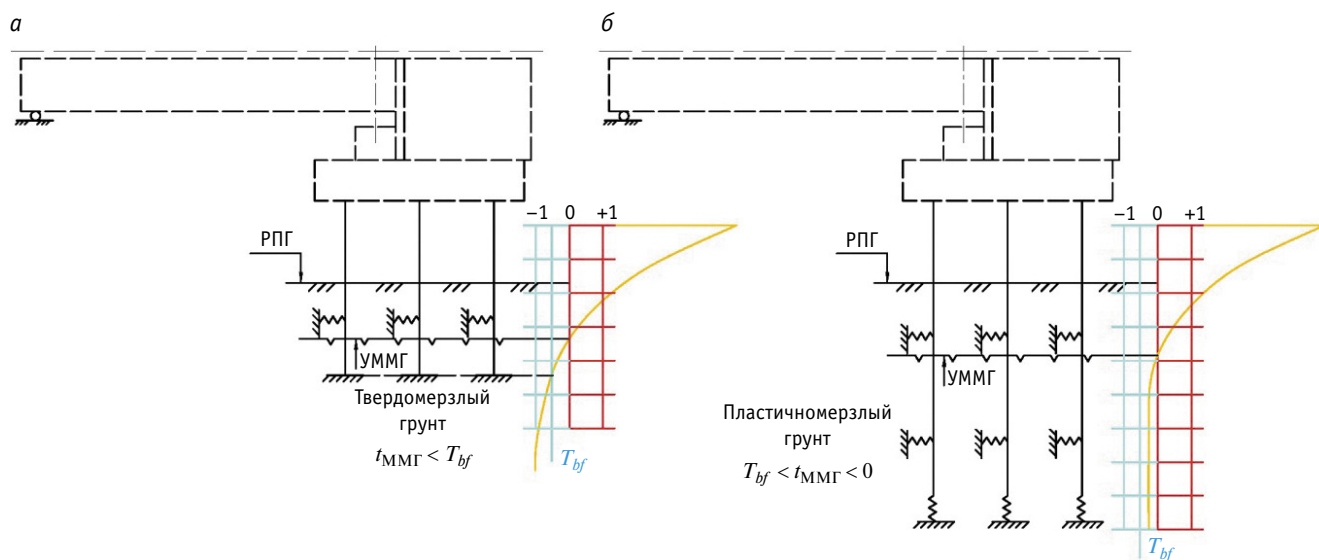


Рис. 4. Расчетная схема устоя безростеркового типа на столбах:

а — твердомерзлые грунты основания (жесткая заделка столбов); б — пластичномерзлые грунты основания (упругое основание); T_{bf} — температура начала замерзания грунта; $t_{ммг}$ — температура многолетнемерзлого грунта

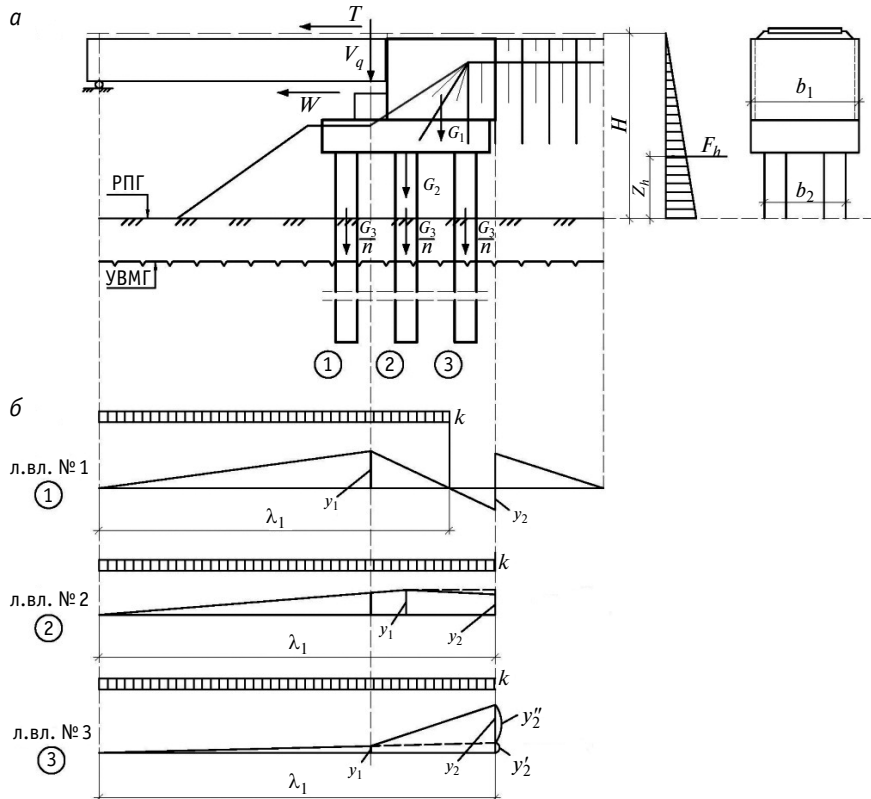


Рис. 5. Загрузка устоя безростеркового типа постоянными и временными нагрузками:

а — схема загрузки постоянными и временными нагрузками; б — линии влияния нормальных сил для сечения по подошве столба переднего (№ 1), среднего (№ 2) и заднего (№ 3) ряда; k — интенсивность временной нагрузки, кН/м; l_1 — длина загрузки линий влияния, м; y_i — i -я ордината линии влияния; T — тормозная нагрузка, кН; W — ветровая нагрузка, кН; G_1, G_2, G_3 — нагрузка от собственного веса шкафного блока, насадки и столбов, кН; h — высота насыпи, м; F — равнодействующая сила от давления насыпи на уровне z_h от подошвы, кН; b_1 — ширина шкафного блока, м; b_2 — расстояние по внешним граням столбов, м

Схема загрузки безростеркового устоя на столбах постоянными и временными нагрузками, принятая с использованием положений, изложенных в нормативно-технической и научной литературе [3, 5], представлена на рис. 5.

Расчетные сочетания нагрузок для определения грузоподъемности каждого ряда столбов устоя безростеркового типа для расчета по несущей способности по грунту приведены в табл. 1.

Анализ конструктивных решений столбчатых устоев безростеркового типа показал, что, как правило, наиболее нагруженным является передний ряд. Эта особенность продиктована расположением опорной площадки пролетного строения над передним рядом столбов. Таким образом, в большинстве случаев грузоподъемность устоев безростеркового типа при проверке по несущей способности по грунту допустимо определять только для переднего ряда столбов (рис. 5а). В случае если температурный режим мерзлоты в основании устоев по переднему и заднему ряду существенно различается, требуется определять грузоподъемность столбов каждого ряда.

Методы и последовательность расчета и определения грузоподъемности столбов устоев безростеркового типа обусловлены как их техническим состоянием, так и тепловым режимом грунтов

в основании. Тепловой режим грунтов основания (натурные измерения, данные моделирования) определяет физическое состояние мерзлых грунтов — твердомерзлые, пластичномерзлые или талые.

Для эксплуатируемых сооружений фактические величины деформаций (осадки, крены) должны быть не более предельных значений, определяемых по п. 7.2.15 [3] для пластичномерзлых грунтов ($s < s_u$). Определение осадки для столбов, опираемых на твердомерзлые грунты, не требуется.

Определение крена устоев изложено в ряде нормативных и научных источников. Так, в рекомендациях [6] предельная величина продольных деформаций опор мостов с разрезными пролетными строениями должна быть не менее $0,5\sqrt{l_0}$ (в см), где l_0 — длина меньшего примыкающего к опоре пролета, принимаемая не менее 25 м. Согласно [6], величина горизонтального смещения верха опор в зависимости от категории неисправности принимается от 0,01 до 0,05 (и более) толщины опоры. В актуальной на сегодняшний день инструкции [7] предельные крены вдоль оси моста и горизонтальные смещения принимаются в зависимости от категории дефекта (табл. 2).

В случае если фактическая осадка или крены сооружения превышают предельные значения, требуется принять решение об усилении или реконструкции сооружения по специально разработанному проекту и, кроме того, установить постоянный мониторинг за деформациями.

Переход мерзлых грунтов оснований из твердомерзлого в пластичномерзлое состояние сопровождается изменением их прочностных характеристик. Таким образом, в случае если факт повышения температуры грунтов выше T_{bf} зафиксирован, то требуется проведение инженерно-геокриологических изысканий для определения фактических (измененных по сравнению с начальным состоянием грунтов) физико-механических свойств и структуры грунтов.

В случае если температурный режим многолетнемерзлого грунта основания мостового перехода не установлен при натурном обследовании, этот режим можно определить методом моделирования [8]. Кроме того, при помощи теплотехнической модели мостового перехода возможно

Таблица 2

Предельные крены вдоль оси моста и горизонтальные смещения [7]

Индекс	Наименование	Неисправность		Характеристика		Категория дефекта
		Наименование	Значение	Значение		
				min	max	
2500	Крен вдоль оси моста	Крен, ‰	2,5	6	1	
			6	9,5	2	
			9,5		3	
2510	Смещение вдоль оси моста с защемлением пролетных строений	Смещение, см	2	4	1	
			4	8	2	
			8		3	

1. Обследование технического состояния устоев, выявление дефектов и деформаций (крены, просадки)		
2. Измерение температурного режима ММГ основания мостового перехода (при наличии термометрических скважин) в реальных условиях или выполнение теплотехнических расчетов по рассматриваемой в данной работе модели мостового перехода		
3. Установление фактического или расчетного теплового режима мерзлых грунтов оснований и их физического состояния		
а	б	
Твердомерзлые ($\delta_f < 0,1$ кПа; $t_{ММГ} < T_{bf}$)	Пластичномерзлые ($\delta_f > 0,1$ кПа; $T_{bf} < t_{ММГ} < 0$)	
4. Расчет по деформациям (фактическая осадка или крен не выше предельного)		
Не требуется	По осадке	$s_f < s_u$
	По крену	$U_x < [U_x]$
5. Выполнение инженерно-геокриологических изысканий		
Не требуется	Требуется	
6. Формирование расчетной схемы устоя		
В пространственной постановке с учетом совместной работы плиты насадки, столбов и их оснований		
В виде рамы с жестко заделанными столбами в твердомерзлый грунт на уровне, где выполняется условие $t_{ММГ} = T_{bf}$	В виде рамы на упругом основании с использованием новых (измененных по сравнению с начальным состоянием грунтов) физико-механических параметров грунтов (ИГИ)	
7. Определение и прогноз класса грузоподъемности <i>i</i>-го столба грунта и класса опоры		
$K_i(t) = \frac{1}{\gamma_n} \frac{(R(t)A + \sum R_{aff}(t)A_{aff} - \gamma_d F_{neg}) - \sum N_i^n - N_i^Y}{k_c(\varepsilon_k \gamma_{jk} \omega_{k_i}^N + 0,1 a_i \lambda_i \gamma_{fi})}$ $K_{оп}(t) = \min(K_1, K_2 \dots K_i)$		
8. Планирование ремонтно-восстановительных и охлаждающих мероприятий		

Рис. 6. Алгоритм определения грузоподъемности опор безростверкового типа на столбах

прогнозировать тепловой режим мерзлого грунта на любой последующий период эксплуатации с учетом влияния комплекса природно-климатических и специфических факторов, а также перспективы роста временных нагрузок.

Алгоритм определения грузоподъемности опор безростверкового типа на столбах, включающий математическое моделирование теплового режима многолетнемерзлых оснований мостового перехода, представлен на рис. 6.

Пример графика, показывающий изменение класса грузоподъемности столбчатой опоры устоя моста на км 2723 ПК8 участка Тында — Новый Ургал по несущей способности по грунту при изменении температуры многолетнемерзлых грунтов показан на рис. 7. Этот график отражает прогнозный класс опоры по грузоподъемности для случая, когда мероприятия, направленные на сохранение многолетней мерзлоты в зоне опор моста, не предусматриваются и происходит дальнейшее повышение температур мерзлоты, что может привести к росту деформаций искусственных сооружений (ИССО).

ВЫВОДЫ

1. Разработаны расчетная методика и алгоритм определения и прогноза грузоподъемности (на основе принципа классификации) столбчатых опор мостов, эксплуатируемых на многолетнемерзлых основаниях и построенных по принципу I.

2. На изменение класса грузоподъемности столбчатых (безростверковых) опор при оттаивании их многолетнемерзлых оснований главным образом оказывают влияние параметры, по которым определяется расчетное давление (вид грунта, льдистость, влажность, температура грунта и др.) под подошвой столба R и расчетное сопротивление сдвигу по поверхности смерзания R_{af} .

3. Представленную методику определения грузоподъемности опор безростверкового типа на столбах предлагается включить в руководство [1] для использования проектными и эксплуатирующими организациями при назначении режимов эксплуатации мостов, а также при реализации ремонтно-восстановительных мероприятий с целью сохранения потребительских свойств ИССО в районах распространения

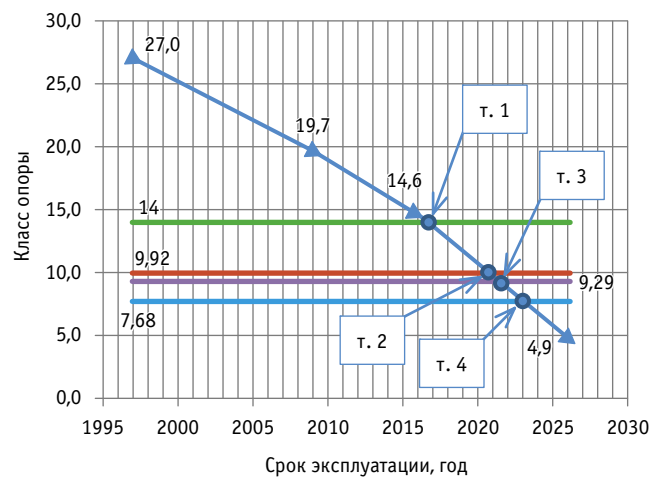


Рис. 7. График изменения класса грузоподъемности столбов переднего ряда опоры моста в зависимости от срока эксплуатации сооружения:

▲ — класс опоры; — класс нагрузки I категории; — класс нагрузки II категории; — класс нагрузки III категории; — класс нагрузки IV категории; т.1 — время службы 2017 г. — I категория нагрузки ($K_0 = 14$); т.2 — время службы 2021 г. — II категория нагрузки ($K_0 = 9,92$); т.3 — время службы 2022 г. — III категория нагрузки ($K_0 = 9,29$); т.4 — время службы 2023 г. — IV категория нагрузки ($K_0 = 7,68$)

многолетнемерзлых грунтов. Это позволит научно обоснованно планировать эксплуатационные и ремонтно-восстановительные работы, а также материальные и финансовые затраты не только на ближайшую (3–5 лет), но также на среднюю (7–10 лет) и дальнюю (15–20 лет) перспективу.

Литература

1. Руководство по определению грузоподъемности опор железнодорожных мостов / ОАО «РЖД». Москва, 2015. 185 с.
2. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Минрегион России. Москва, 2012. 140 с.
3. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы / Минрегион России. Москва, 2011. 346 с.
4. СП 354.1325800.2017. Фундаменты опор мостов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов / Минстрой России. Москва, 2017. 81 с.
5. Власов Г. М. Проектирование опор мостов : учебное пособие. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2003. 332 с.
6. Методические рекомендации по проектированию опор мостов. Ленинград, 1988. 63 с.
7. Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации / Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД». Москва, 2006. 120 с.
8. Математическое моделирование температурного режима многолетнемерзлых оснований опор малых и средних мостов с использованием программного комплекса «Permafrost 3D» / Б. Н. Смышляев, Я. А. Швец, В. Д. Кауркин, И. И. Гнатюк // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 64. № 4. С. 147–155. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).147-155. ISSN 1813–9108.

References

1. Manual on determination of carrying load of poles for railway bridges [Руководство по определению грузоподъемности опор железнодорожных мостов] / JSC «RZD». Moscow, 2015. 185 p.
2. SP 25.13330.2012. Foundations on permafrost ground [Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах] / Ministry of Regional Development of the Russian Federation. Moscow, 2012. 140 p.
3. SP 35.13330.2011. Bridges and culverts [Мосты и трубы] / Ministry of Regional Development of the Russian Federation. Moscow, 2011. 346 p.
4. SP 354.1325800.2017. Foundations of bridge poles in distribution areas of permafrost ground [Фундаменты опор мостов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов] / Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. Moscow, 2017. 81 p.
5. Vlasov G. M. Designing of bridge poles [Проектирование опор мостов] : textbook. Novosibirsk : Publishing House of STU, 2003. 332 p.
6. Guidelines on designing of bridge poles [Методические рекомендации по проектированию опор мостов]. Leningrad, 1988. 63 p.
7. Instructions on assessment of the conditions and maintenance of artificial constructions on railways of the Russian Federation [Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации] / Track and Constructions Department of the JSC «RZD». Moscow, 2006. 120 p.
8. Mathematical modeling of temperature regime of permafrost pillar bases of small and medium-size bridges using Permafrost 3d software [Математическое моделирование температурного режима многолетнемерзлых оснований опор малых и средних мостов с использованием программного комплекса «Permafrost 3D»] / B. N. Smyslyayev, Ya. A. Shvets, V. D. Kaurkin, I. I. Gnatyuk // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2019. Vol. 64. No. 4. Pp. 147-155. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).147-155. ISSN 1813-9108.

УДК 621.892.097.2

Елена Роменовна Магарил, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Экономика природопользования» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЕМ БЕНЗИНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОПРИСАДКОЙ

Elena Romenovna Magaril, DSc in Engineering, Professor, Head of Environmental Economics Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

Improvement of vehicles operation by application of gasoline modified with nano-additive

Аннотация

Представлены результаты исследований влияния разработанной наноприсадки на расход бензина, акустические колебания и вибрацию в автомобильном двигателе. Проведенные в условиях загородной езды испытания показали снижение удельного расхода бензина, модифицированного наноприсадкой, до 14,08 % относительно стандартного бензина. Соответственно снижению расхода бензина сокращаются выбросы токсичных веществ и парниковых газов. Установлено, что введение в бензин наноприсадки улучшает процесс сгорания топлива, снижает уровень шума и вибрации при эксплуатации автомобилей и позволяет уменьшить загрязнение акустической среды. Использование бензина, модифицированного наноприсадкой, способствует значительному оздоровлению экологической обстановки и снижению потребления дефицитных углеводородных топлив.

Ключевые слова: модифицированный бензин, наноприсадка, энергоэффективность, загрязнение акустической среды, экологическая безопасность автомобилей.

Summary

The results of studies of the influence of the developed nano-additive on gasoline consumption, acoustic vibrations and vibration in the engine are presented. The conducted tests of the effect of the nano-additive application on fuel efficiency in highway driving conditions showed a decrease in the specific consumption of gasoline modified with a nano-additive up to 14.08 % relative to standard gasoline. Accordingly, the reduction in gasoline consumption will reduce emissions of toxic substances and greenhouse gases. It was found that the introduction of nano-additive into gasoline, which improves the combustion process, reduces the level of noise and vibration during vehicle operation and makes it possible to reduce the pollution of the acoustic environment. The use of gasoline modified with a nano-additive can significantly improve the environmental situation and reduce the consumption of scarce hydrocarbon fuels.

Keywords: modified gasoline, nano-additive, energy efficiency, acoustic pollution, environmental safety of cars.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-75-79

ВВЕДЕНИЕ

Смена технологических укладов сопровождается длительным и непростым периодом замены энергоносителей. На современном этапе обострение экологических проблем, связанных с потреблением и ускоренным исчерпанием ископаемых топлив, требует принятия безотлагательных мер по расширению использования новых экологически приемлемых и энергоэффективных технологий для всех отраслей, потребляющих традиционные углеводородные топлива. Многие развитые страны, не обладая значительными запасами углеводородных ресурсов, активно внедряют новейшие разработки в области альтернативной энергетики. Между тем кардинальное изменение структуры мирового потребления энергии невозможно осуществить мгновенно, так как этот процесс требует длительного времени. Согласно оценкам British Petroleum [1], транспорт — это один из основных конечных потребителей мировой энергии (21 % в 2020 г.) и основной потребитель жидких нефтяных топлив. К 2050 г. по прогнозам U. S. Energy Information Administration (EIA) [2] потребление транспортным сектором жидких топлив составит 59 % общего объема конечного потребления, не меняясь существенно относительно уровня 2018 г. В то же время доля использования альтернативных видов топлива и энергии на транспорте, которая в настоящее время не вносит серьезного вклада в общую структуру потребления энергии, в долгосрочной перспективе будет расширяться, что снизит спрос на ископаемые топлива. По прогнозам, внутри транспортного сектора потребность в нефтепродуктах сократится с 94 до 80–82 % к 2050 г. [1, 2] за счет медленного роста использования альтернативных топлив.

Однако будущая диверсификация топливных ресурсов в транспортном секторе не исключает необходимости принятия безотлагательных мер относительно повышения энергоэффективности и улучшения экологических параметров традиционных топлив [3–6], изменений требований к качеству моторных топлив [7], совершенствования налогового законодательства [8–12]. Приоритетом становится использование новых технологий, включая нанотехнологии.

К числу известных методов эффективного улучшения характеристик нефтепродуктов относится применение присадок, вводимых в топливо в малых количествах [13–17]. Использование наноприсадок для модифицирования свойств традиционных моторных топлив может дать намного больший эффект, чем прежние поколения присадок [18–21]. Как известно, переход в наноразмерное состояние значимо изменяет реакционную способность, а также химические и физические свойства веществ. Многофункциональные присадки к топливу, согласно ранее проведенным исследованиям [21–23], должны сочетать свойства поверхностно-активного вещества и эффективного катализатора окислительно-восстановительных реакций. Использование размерного эффекта позволяет применять наноразмерные и наноструктурированные материалы при разработке катализаторов нового поколения, где в катализ вовлекается большее количество активного металла, за счет роста доли поверхностных атомов в их общем количестве, повышающей удельную активность металла по сравнению с традиционными твердотельными катализаторами.

В статье представлены результаты исследований о влиянии разработанной многофункциональной наноприсадки к бензину на топливную эффективность, а также на уровни шума и вибрации при эксплуатации автомобилей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе испытаний использовали стандартный бензин с октановым числом по исследовательскому методу 95 (Lukoil) и этот же бензин, модифицированный введением поверхностно-активной наноприсадки $(C_{12}H_{25}COO)^2X$, где X — каталитически активный металл, в ранее установленной [21] оптимальной концентрации 18 ppm.

Для изучения влияния наноприсадки на топливную эффективность на шоссейном участке 850 км проводили дорожные испытания автомобилей Lada Priora и Ford Focus, задавая постоянную скорость 60 км/ч. Погодные условия в период испытаний были стабильными. На каждом из автомобилей проводили по два пробега с использованием стандартного бензи-

на, определяя исходные значения удельного расхода топлива и измеряя удельный расход в конце пробега. Затем проводили по два пробега с использованием модифицированного бензина, контролируя расход топлива. Отклонение полученных величин удельного расхода топлива от среднего значения в двух параллельных пробегах для всех моделей не превышало 3%.

Влияние модифицированного бензина на уровни шума и вибрации исследовали на двигателе автомобиля VAZ-2106 с использованием шумомера Bruel & Kjaer (Дания) 2226 № 1788689 ВШВ-003 № 671. Замеры шума и вибрации проводили на установившихся режимах движения. Первоначально измеряли акустические колебания и вибрацию с использованием стандартного бензина. Затем автомобиль переходил на использование модифицированного бензина. Повторно уровни шума и вибрации замеряли после 600 км пробега на модифицированном бензине.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕНЗИНА НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА

Результаты испытаний по влиянию модифицированного бензина на удельный расход топлива представлены на рис. 1.

Сочетание поверхностно-активного и каталитического действия многофункциональной наноприсадки обеспечивает значительное повышение топливной эффективности двигателей автомобилей.

Удельный расход модифицированного бензина до начала пробега принят равным удельному расходу стандартного бензина, полученному в предварительных испытаниях. Значительно меньшее повышение топливной эффективности на ранних этапах пробега объясняется тем, что первоначальный эффект обеспечивается в основном за счет поверхностно-активного действия присадки, способствующей лучшему смесеобразованию в двигателе [24, 25]. Более существенное снижение удельного расхода топлива возможно после устранения нагара в двигателе в результате каталитического действия присадки. По мере формирования защитно-каталитического нано-

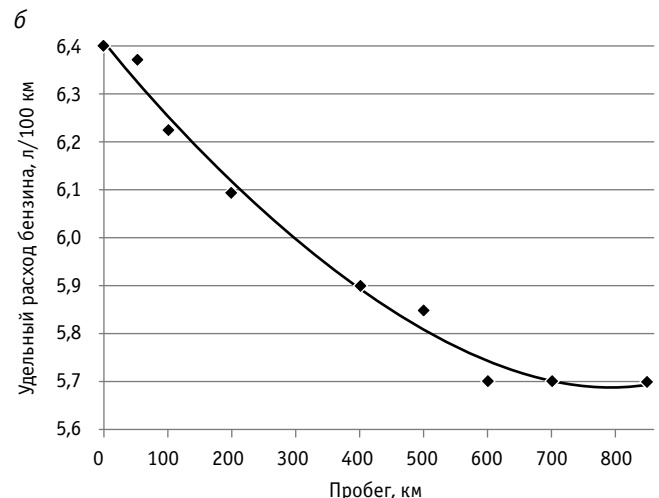
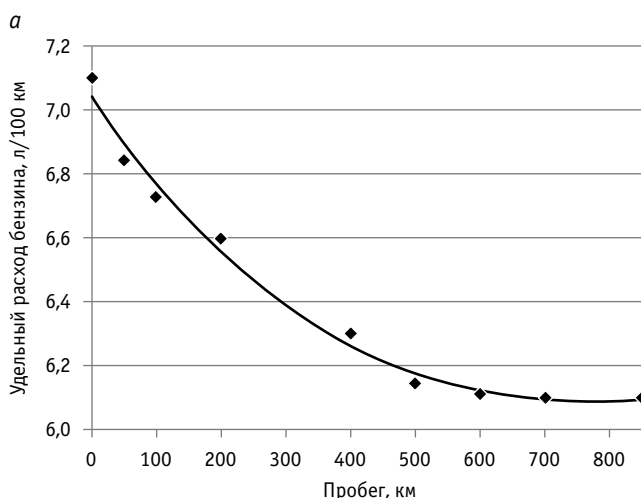


Рис. 1. Влияние применения модифицированного бензина на топливную эффективность двигателей автомобилей Lada Priora (а) и Ford Focus (б)

слоя на рабочих поверхностях в двигателе происходит полное очищение от нагара [22, 24, 26, 27], удельный расход бензина достигает максимального значения, которое в дальнейшем не меняется. Максимальное снижение удельного расхода зафиксировано после 550–600 км пробега на бензине, модифицированном введением наноприсадки, оно составило 14,08% для автомобиля Lada Priora и 10,94% для Ford Focus, что выше, чем в ранее проведенных испытаниях [21] (11,3 и 7,8% соответственно). Это объясняется большей длительностью пробега и достижением максимально возможного эффекта повышения топливной экономичности в результате использования топлива, модифицированного наноприсадкой, тогда как в предыдущих экспериментах при длине пробега 420 км максимальный эффект достигнут не был. Согласно ранее проведенным исследованиям [21], применение наноприсадки позволяет использовать бензин с пониженным октановым числом, что соответствует представлениям о влиянии нагара на требования к октановому числу автомобилей [28–30]. Соответственно снижению удельного расхода сократятся и выбросы углекислого газа. С учетом ранее полученных данных [26, 27] о влиянии прототипа наноприсадки на экологические характеристики двигателей можно заключить, что снижение выбросов токсичных веществ при использовании модифицированного топлива должно быть еще более существенным.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕНЗИНА НА УРОВЕНЬ ШУМА И ВИБРАЦИИ

На рис. 2 и 3 представлены результаты исследований влияния бензина, модифицированного введением наноприсадки, на акустические колебания и вибрацию в двигателе.

В диапазоне частот 32–8000 Гц среднее снижение шума двигателя составило 7,13% на скорости 50 км/ч (передатка 3) и 8,35% на скорости 90 км/ч (передатка 4).

Более значительное снижение акустических колебаний, чем было достигнуто ранее [21] (6,23 и 6,3% на указанных скоростях), связано с тем, что в прежних испытаниях уровень шума измеряли

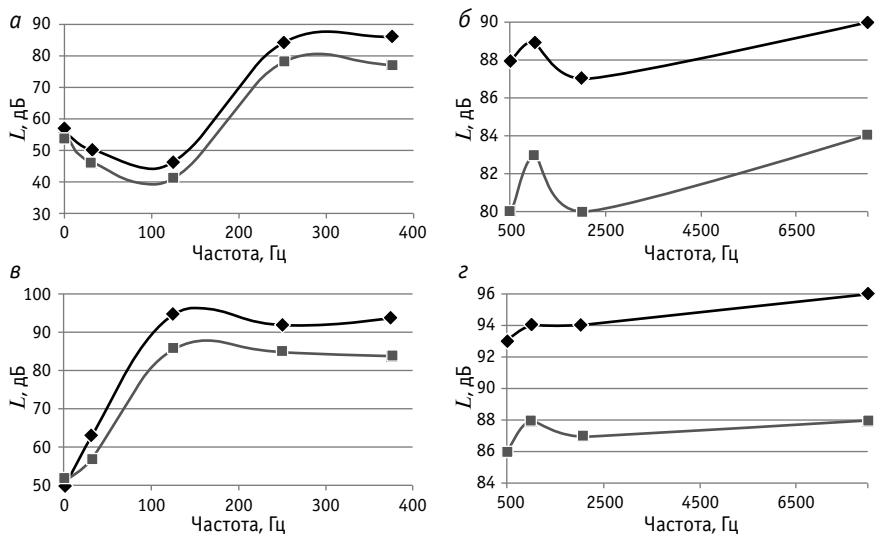


Рис. 2. Влияние модифицированного бензина на изменение акустических колебаний в двигателе:

а, б — измеренный уровень звука на скорости 50 км/ч (передатка 3); в, з — измеренный уровень звука на скорости 90 км/ч (передатка 4); —◆— стандартный бензин; —■— бензин с присадкой

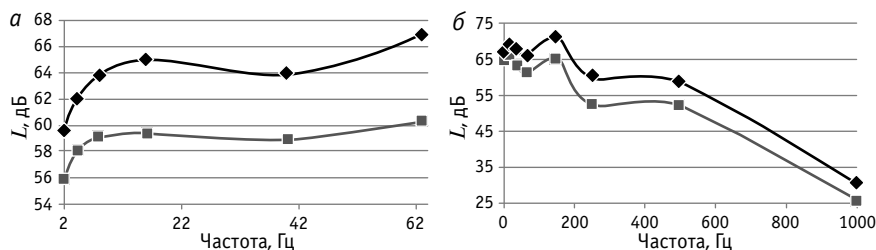


Рис. 3. Влияние модифицированного бензина на изменение уровня вибрации:

а — изменение уровня вибрации (общей) на скорости 60 км/ч (передатка 4); б — изменение уровня вибрации (локальной) на скорости 70 км/ч (передатка 4); —◆— стандартный бензин; —■— бензин с присадкой

при меньшем пробеге автомобилей на модифицированном топливе, тогда как в данном эксперименте пробег составил 600 км. Увеличение пробега обеспечило большее устранение нагара за счет каталитического воздействия наноприсадки, что повысило плавность сгорания топлива и снизило акустические колебания в двигателе.

Измерения уровня вибрации также подтвердили эффективность применения модифицированного бензина относительно влияния на вибрационные воздействия. На частотах от 2 до 63 Гц снижение вибрации (общей) на скорости 60 км/ч (передатка 4) составило в среднем 7,8%. Локальная вибрация на скорости 70 км/ч (передатка 4) на частотах 16–1000 Гц снизилась в среднем на 8,11%.

Автомобильный транспорт вносит весомый вклад не только в загрязне-

ние атмосферного воздуха выбросами токсичных веществ и парниковых газов, но и в загрязнение акустической среды, что обусловлено повышенными уровнями шума и вибрации при эксплуатации автомобилей. Возможность существенно снизить загрязнение акустической среды за счет применения модифицированного бензина, несомненно, значима с точки зрения оздоровления городской среды и снижения негативного влияния на здоровье владельцев транспортных средств и пассажиров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение бензина, модифицированного введением разработанной наноприсадки, дает возможность существенно повысить топливную экономичность автомобильных двигателей, что при его широком внедрении значительно замедлит темпы

снижения запасов нефтяных ресурсов. Одновременно это будет способствовать оздоровлению экологической обстановки, так как за счет соответствующего уменьшения потребления бензина, снижения выбросов токсичных продуктов горения и парниковых газов уменьшится загрязнение акустической среды. В дальнейшем целесообразно провести исследования о зависимости эффективности использования предлагаемой технологии от возраста автомобилей. Можно ожидать, что для автомобилей, которые дольше находятся в эксплуатации, за счет большего слоя нагара в двигателе влияние на расход топли-

ва будет отличаться от влияния на топливную экономичность двигателей новых автомобилей. Применение бензинов, модифицированных наноприсадкой, позволяет достичь серьезного эколого-экономического эффекта и повысить топливную эффективность эксплуатации автомобилей на современном этапе, когда доля альтернативных топлив и энергии в структуре потребления мировым автопарком остается невысокой.

Исследование поддержано программой 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

Литература

1. BP Energy Outlook 2020. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html> (дата обращения: 11.05.2021).
2. International Energy Outlook 2019 with projections to 2050. U. S. Energy Information Administration, 2019.
3. Recent trends for introducing promising fuel components to enhance the anti-knock quality of gasoline: A systematic review / T. M. M. Abdellatif, M. A. Ershov, V. M. Kapustin [et al.] // Fuel. 2021. 291. 120112.
4. Магарил Е. Р. Модернизация нефтепереработки как фактор устойчивого развития автотранспорта // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2011. № 4. С. 32–37. ISSN 2412–5725.
5. Магарил Е. Р. Моторные топлива. Москва : КДУ, 2010. 159 с.
6. Motor gasolines technical review (FTR-1) / L. Gibbs, B. Anderson, K. Barnes et al. USA : Chevron Corporation, 2009.
7. Worldwide Fuel Charter / 5th ed. Belgium : ACEA, 2013.
8. Влияние транспортных средств на качество воздуха в России и Италии и механизмы устойчивого развития автомобильного транспорта / Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил, Л. Л. Абржина [и др.] // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 77–84. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-77-84. ISSN 1815–9400.
9. Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Влияние плотности топлив на эксплуатационные и экологические характеристики автомобилей // Известия вузов. Нефть и газ. 2016. № 6. С. 108–116. ISSN 0445–0108.
10. Голубева А. С., Магарил Е. Р. Экономическое стимулирование сокращения эмиссии CO₂ автотранспортом // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2016. Т. 15. № 3. С. 359–381. ISSN 2412–5725.
11. Майбуров И. А., Леонтьева Ю. В. Экологизация транспортных налогов как перспективный вектор их совершенствования // Финансы. 2014. № 9. С. 35–39. ISSN 0869–446X.
12. Майбуров И. А., Леонтьева Ю. В. Экологизация транспортных налогов как фактор повышения экономической безопасности // Инновационное развитие экономики. 2014. № 6–1 (23). С. 21–25. ISSN 2223–7984.
13. Danilov A. M. Development and use of fuel additives during 2006–2010 // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2012. 47 (6). Pp. 470–484.
14. Srivastava S. P., Hancsó J. Fuels and Fuel-Additives. USA : John Wiley & Sons Inc, 2014.

References

1. BP Energy Outlook 2020. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html> (access date: 11.05.2021).
2. International Energy Outlook 2019 with projections to 2050. U. S. Energy Information Administration, 2019.
3. Recent trends for introducing promising fuel components to enhance the anti-knock quality of gasoline: A systematic review / T. M. M. Abdellatif, M. A. Ershov, V. M. Kapustin [et al.] // Fuel. 2021. 291. 120112.
4. Magaril E. R. Oil refining modernization as the factor of motor transport sustainable development [Modernizatsiya neftepererabotki kak faktor ustoychivogo razvitiya avtotransporta] // Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management. 2011. No. 4. Pp. 32–37. ISSN 2412–5725.
5. Magaril E. R. Motor fuels [Motornye topliva]. Moscow : KDU, 2010. 159 p.
6. Motor gasolines technical review (FTR-1) / L. Gibbs, B. Anderson, K. Barnes et al. USA : Chevron Corporation, 2009.
7. Worldwide Fuel Charter / 5th ed. Belgium : ACEA, 2013.
8. Impact of vehicles on air quality in Russia and Italy and mechanisms for sustainable development of road transport [Vliyanie transportnykh sredstv na kachestvo vozdukh v Rossii i Italii i mekhanizmy ustoychivogo razvitiya avtomobil'nogo transporta] / E. R. Magaril, R. Z. Magaril, L. L. Abrzhina [et al.] // Transport of the Urals. 2017. No. 2 (53). Pp. 77–84. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-77-84. ISSN 1815–9400.
9. Magaril E. R., Magaril R. Z. Effect of density of fuels on the operational and ecological characteristics of motor vehicles [Vliyanie plotnosti topliv na ekspluatatsionnye i ekologicheskie kharakteristiki avtomobiley] // Oil and Gas Studies. 2016. No. 6. Pp. 108–116. ISSN 0445–0108.
10. Golubeva A. S., Magaril E. R. Economic stimulation to reduce vehicle CO₂ emissions [Ekonomicheskoe stimulirovanie sokrasheniya emissii CO₂ avtotransportom] // Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management. 2016. Vol. 15. No. 3. Pp. 359–381. ISSN 2412–5725.
11. Mayburov I. A., Leontyeva Yu. V. Ecologization of transport taxes as a prospective vector of their development [Ekologizatsiya transportnykh nalogov kak perspektivnyy vektor ikh sovershenstvovaniya] // Finance. 2014. No. 9. Pp. 35–39. ISSN 0869–446X.
12. Mayburov I. A., Leontyeva Yu. V. Ecologization of transport taxes as a factor of increasing economic security [Ekologizatsiya transportnykh nalogov kak faktor povysheniya ekonomicheskoy bezopasnosti] // Innovative Development of Economy. 2014. No. 6–1 (23). Pp. 21–25. ISSN 2223–7984.
13. Danilov A. M. Development and use of fuel additives during 2006–2010 // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2012. 47 (6). Pp. 470–484.
14. Srivastava S. P., Hancsó J. Fuels and Fuel-Additives. USA: John Wiley & Sons Inc, 2014.

15. Priyadarshi D., Paul K. K., Pradhan S. Impacts of biodiesel, fuel additive, and injection pressure on engine emission and performance // Journal of Energy Engineering. 2019.145. 04019006.
16. Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Повышение экологической безопасности и эффективности эксплуатации автотранспорта применением присадки к топливам // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 84–89. ISSN 1815–9400.
17. Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Снижение потерь бензина от испарения введением поверхностно-активной топливной присадки // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 93–97. ISSN 1815–9400.
18. Impact of emulsion fuel with nano-organic additives on the performance of diesel engine / W. M. Yang, H. An, S. K. Chou et al. // Applied Energy. 2013. 112. Pp. 1206–1212.
19. Sahoo R. R., Jain A. Experimental analysis of nanofuel additives with magnetic fuel conditioning for diesel engine performance and emissions // Fuel. 2019. 236. Pp. 365–372.
20. Performance and emissions investigation of a single cylinder diesel engine using enhanced blend biodiesel by nanoparticles / H. H. Al-Kayiem, H. A. A. Wahhab, E. Magaril, A. R. A. Aziz // AIP Conference Proceedings. 2018. 2035. 020008.
21. Применение наноприсадки для повышения экологической безопасности и топливной экономичности автомобилей / Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил, Е. Н. Скворцова, И. А. Анисимов // Транспорт Урала. 2020. № 3 (66). С. 51–56. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-51-56. ISSN 1815–9400.
22. Magaril E. & Magaril R. Fuel Quality: Challenges to the Sustainable Development of Automobile Transport and Approach to Solution // E3S Web of Conferences. 2016. 6. 03001.
23. Magaril E., Magaril R. Improving the environmental and performance characteristics of vehicles by introducing the surfactant additive into gasoline // Environmental Science and Pollution Research. 2016. 23 (17). Pp. 17049–17057.
24. Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Повышение экологической устойчивости автотранспорта улучшением качества топлив // Известия вузов. Нефть и газ. 2016. № 4. С. 103–110. ISSN 0445–0108.
25. Magaril E., Magaril R. Impact of surfactants in micro concentrations on certain properties of organic liquids as a basis for improving some oil-and-gas industry processes and properties of gasoline // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2017. 529. Pp. 733–738.
26. Влияние нагарообразования на экологическую безопасность эксплуатации автомобилей с бензиновыми двигателями / Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил, А. В. Чендарев, Н. В. Корзун // Известия вузов. Нефть и газ. 2011. № 3. С. 85–88. ISSN 0445–0108.
27. Защитно-каталитический нанослой для бензиновых двигателей внутреннего сгорания / Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил, В. Г. Бамбуров [и др.] // Химическая технология. 2011. Т. 12. № 8. С. 485–490. ISSN 1684–5811.
28. Магарил Е. Р., Магарил Р. З., Бамбуров В. Г. Особенности процесса горения в бензиновых двигателях внутреннего сгорания // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 1. С. 85–89. ISSN 0430–6228.
29. Gruse W. A., Stevens D. R. Chemical Technology of Petroleum New York : McGraw-Hill, 1960.
30. Гуреев А. А., Азев В. С. Автомобильные бензины. Свойства и применение. Москва : Нефть и газ, 1996. 444 с.
15. Priyadarshi D., Paul K. K., Pradhan S. Impacts of biodiesel, fuel additive, and injection pressure on engine emission and performance // Journal of Energy Engineering. 2019.145. 04019006.
16. Magaril E. R., Magaril R. Z. Improving environmental safety and efficient operation of motor vehicles by using fuel additive [Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti i effektivnosti ekspluatatsii avtotransporta primeneniem prisadki k toplivam] // Transport of the Urals. 2014. No. 2 (41). Pp. 84–89. ISSN 1815–9400.
17. Magaril E. R., Magaril R. Z. Reduction of gasoline evaporation losses through introduction of surfactant fuel additive [Snizhenie poter' benzina ot ispareniya vvedeniem poverkhnostno-aktivnoy toplivnoy prisadki] // Transport of the Urals. 2015. No. 3 (46). Pp. 93–97. ISSN 1815–9400.
18. Impact of emulsion fuel with nano-organic additives on the performance of diesel engine / W. M. Yang, H. An, S. K. Chou et al. // Applied Energy. 2013. 112. Pp. 1206–1212.
19. Sahoo R. R., Jain A. Experimental analysis of nanofuel additives with magnetic fuel conditioning for diesel engine performance and emissions // Fuel. 2019. 236. Pp. 365–372.
20. Performance and emissions investigation of a single cylinder diesel engine using enhanced blend biodiesel by nanoparticles / H. H. Al-Kayiem, H. A. A. Wahhab, E. Magaril, A. R. A. Aziz // AIP Conference Proceedings. 2018. 2035. 020008.
21. Application of nano-additive to gasoline to increase environmental safety and fuel economy of cars [Primenenie nanoprisadki dlya povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti i toplivnoy ekonomichnosti avtomobiley] / E. R. Magaril, R. Z. Magaril, E. N. Skvortsova, I. A. Anisimov // Transport of the Urals. 2020. No. 3 (66). Pp. 51–56. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-51-56. ISSN 1815–9400.
22. Magaril E. & Magaril R. Fuel Quality: Challenges to the Sustainable Development of Automobile Transport and Approach to Solution // E3S Web of Conferences. 2016. 6. 03001.
23. Magaril E., Magaril R. Improving the environmental and performance characteristics of vehicles by introducing the surfactant additive into gasoline // Environmental Science and Pollution Research. 2016. 23 (17). Pp. 17049–17057.
24. Magaril E. R., Magaril R. Z. Enhancement the environmental stability of vehicles through improving the quality of fuels [Povyshenie ekologicheskoy ustoychivosti avtotransporta uluchsheniem kachestva topliv] // Oil and Gas Studies. 2016. No. 4. Pp. 103–110. ISSN 0445–0108.
25. Magaril E., Magaril R. Impact of surfactants in micro concentrations on certain properties of organic liquids as a basis for improving some oil-and-gas industry processes and properties of gasoline // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2017. 529. Pp. 733–738.
26. Influence of carbonization on environmental safety of operation of cars with gasoline engines [Vliyanie nagaroobrazovaniya na ekologicheskuyu bezopasnost' ekspluatatsii avtomobiley s benzinovymi dvigatelyami] / E. R. Magaril, R. Z. Magaril, A. V. Chendarev, N. V. Korzun // Oil and Gas Studies. 2011. No. 3. Pp. 85–88. ISSN 0445–0108.
27. Protective catalytic nano-layer for gasoline internal-combustion engines [Zashhitno-kataliticheskiy нанослой для бензиновых двигателей внутреннего сгорания] / E. R. Magaril, R. Z. Magaril, V. G. Bamburov [et al.] // Chemical Technology 2011. Vol. 12. No. 8. Pp. 485–490. ISSN 1684–5811.
28. Magaril E. R., Magaril R. Z., Bamburov V. G. Specific features of combustion in gasoline-driven internal combustion engines [Osobennosti protsessy goreniya v benzinovykh dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya] // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2014. Vol. 50. No. 1. Pp. 85–89. ISSN 0430–6228.
29. Gruse W. A., Stevens D. R. Chemical Technology of Petroleum New York : McGraw-Hill, 1960.
30. Gureev A. A., Azev V. S. Automobile gasoline. Properties and application [Avtomobil'nye benziny. Svoystva i primeneniye]. Moscow : Oil and Gas, 1996. 444 p.

УДК 625.7:004.942

Виталий Александрович Буйвис, аспирант кафедры транспорта и логистики Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ), Новокузнецк, Россия,

Алексей Викторович Новичихин, доктор технических наук, профессор кафедры «Логистика и коммерческая работа» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В АВТОДОРОЖНОМ КОМПЛЕКСЕ: МЕХАНИЗМ ВОЗВРАТА ИНВЕСТИЦИЙ (НА ПРИМЕРЕ НОВОКУЗНЕЦКА)

Vitaliy Alexandrovich Buyvis, postgraduate student, Transport and Logistics Department, Siberian State Industrial University (SSIU), Novokuznetsk, Russia,

Alexey Viktorovich Novichikhin, DSc in Engineering, Professor, Logistics and Commercial Work Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Distribution of resources in the road complex: the mechanism of return on investments (on the example of Novokuznetsk)

Аннотация

Предложена процедура выбора механизма возврата инвестиций в инфраструктурные проекты, реализуемые в автодорожном комплексе с применением механизмов государственно-частного партнерства (ГЧП). Процедура содержит алгоритм корректировки маршрутов для определения величины ожидаемого платежеспособного спроса. Алгоритм корректировки маршрутов доставки грузов позволяет исключить субъективность получаемых оценок и возможность манипулирования параметрами проектов ГЧП.

Для определения эффективности предлагаемой процедуры выполнено сравнение с методикой расчета величины ожидаемого платежеспособного спроса методом экспертных оценок. Задача решена на примере проекта повышения технического уровня и эксплуатационного состояния Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороги.

Ключевые слова: распределение ресурсов, автодорожный комплекс, проект государственно-частного партнерства, плата за проезд, алгоритм корректировки маршрутов, механизм возврата инвестиций.

Summary

The procedure for selecting the mechanism of return on investment in infrastructure projects implemented in the road complex with the use of public-private partnership (PPP) mechanisms is proposed. The procedure contains an algorithm for adjusting routes to determine the amount of expected effective demand. The algorithm for adjusting cargo delivery routes eliminates the subjectivity of the estimates obtained and the possibility of manipulating the parameters of PPP projects when determining the expected effective demand for travel. To determine the effectiveness of the proposed procedure in this paper, a comparison is made with the method of calculating the value of the expected effective demand by the method of expert assessments. The problem is solved on the example of the project to improve the technical level and operational condition of the Novokuznetsk Ring Road.

Keywords: resource allocation, road complex, public-private partnership project, tolls, route adjustment algorithm, investment return mechanism.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-80-85

ВВЕДЕНИЕ

По итогам 2020 г. Кемеровская область — Кузбасс в рейтинге социально-экономического положения регионов оказалась на 39-м месте из 85 субъектов Российской Федерации (снижение значения интегрального рейтинга составило 12,9 пункта) [1].

Автодорожное хозяйство в Кемеровской области — Кузбассе финансируется за счет средств национальных проектов и дорожных фондов [2]. В результате к 2024 г. в рамках реализации национальных проектов «Безопасные и качественные автомобильные дороги» и «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры» планируется повысить долю протяженности автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям, не менее чем до 50,6% [3, 4]. Увеличение объемов перевозок автомобильным транспортом на 10% по сравнению с плановыми значениями снизило эффективность инвестиций в инфраструктурные проекты автодорожного комплекса Кемеровской области — Кузбасса. Предусмотренные объемы финансирования не позволяют достичь плановых показателей транспортно-эксплуатационного состояния, пропускной способности и уровня безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах региона [5]. Один из инструментов, позволяющий увеличить объемы финансирования и обеспечить достижение запланированных показателей национальных проектов, — привлечение частных инвестиций в инфраструктурные проекты с помощью механизмов государственно-частного партнерства (ГЧП) [6, 7]. Программой социально-экономического развития Кемеровской области — Кузбасса до 2024 г. инвестиции в инфраструктурные проекты автодорожного комплекса за счет заключения концессионных соглашений запланированы в объеме не менее 21,0 млрд руб. (2021–2024 гг.), а в качестве единственного механизма возврата инвестиций предусмотрен прямой сбор платы [5]. В соответствии с «Рекомендациями по реализации про-

ектов государственно-частного партнерства) ожидаемый платежеспособный спрос на проезд на платных участках может оказаться на 20–30% ниже прогнозного значения, что создает угрозу потери до 100% инвестиций частным партнерам [8].

Таким образом, выбор механизма возврата инвестиций в проекты ГЧП автодорожного комплекса осуществляется на основе решения задачи по определению платежеспособного спроса. В статье эта задача решается на примере проекта повышения технического уровня и эксплуатационного состояния Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороги (НКАД) [9].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОЖИДАЕМОГО ПЛАТЕЖЕСПОСОБНОГО СПРОСА НА НОВОКУЗНЕЦКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГЕ МЕТОДОМ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Методика расчета величины ожидаемого платежеспособного спроса методом экспертных оценок разработана в соответствии с Федеральным законом «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [10], ОДМ 218.2.017–2011 [11], ОДМ 218.4.023–2015 [12], Постановлением Правительства Российской Федерации «О плате за проезд транспортных средств по платным автомобильным дорогам общего пользования федерального значения, платным участкам таких автомобильных дорог (в том числе если платным участком автомобильной дороги является отдельное искусственное дорожное сооружение)» [13], федеральными законами «О концессионных соглашениях» [14] и «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [15].

Процесс расчета величины ожидаемого платежеспособного спроса состоит из трех этапов.

На первом этапе определяются нижняя и верхняя границы значения платы за проезд по платной дороге. Для этого рассчитываются:

величина экономической выгоды, получаемой пользователями платных дорожных услуг, по сравнению с альтернативным бесплатным маршрутом;

нижняя граница платы за проезд, ниже которой предоставление платных услуг экономически нецелесообразно, так как не покрываются затраты на текущее содержание дорожного объекта;

предельная (максимальная) граница платы за проезд, превышение которой лишает пользователей платных дорожных услуг экономической выгоды.

На втором этапе полученный диапазон значений платы за проезд разбивается на равные интервалы. Для каждого интервала определяется среднее значение платы. Далее методом экспертных оценок определяется наиболее предпочтительная для пользователей платного объекта величина платы за проезд.

На последнем, третьем, этапе определяются значения платы за проезд и ожидаемого платежеспособного спроса, максимально удовлетворяющие всем требованиям, заявленным инвесторами и пользователями объектов автодорожного комплекса.

Исходные данные для определения ожидаемого платежеспособного спроса на НКАД

1. Платный дорожный объект — Новокузнецкая кольцевая автомобильная дорога. Протяженность 49,6 км, средняя скорость движения 53,53 км/ч.

2. Альтернативный маршрут — улично-дорожная сеть г. Новокузнецка и пос. Колачево, включая ул. Куйбышева и ул. Дмитрова. Протяженность маршрута 37 км, средняя скорость движения 32,84 км/ч.

3. Ежегодные затраты — 142,82 млн руб.

4. Требования инвестора: срок окупаемости не более 10 лет, значение чистого дисконтированного дохода за период реализации проекта — не менее 500 млн руб.

Решение

1. Величина экономической выгоды, получаемой пользователями платных дорожных услуг, по сравнению с альтернативным бесплатным маршрутом составляет 66,77 руб./авт.

2. Нижняя граница платы за проезд, ниже которой предоставление платных услуг экономически нецелесообразно, составляет 13,00 руб./авт.

3. Рассчитанные средние значения платы за проезд приведены в табл. 1.

4. Для определения наиболее предпочтительной для пользователей автодорожным объектом платы за проезд обработана 351 экспертная оценка.

5. По результатам обработки экспертных данных (табл. 2) установлено, что наиболее приемлемой для пользователей НКАД является плата за проезд в размере 20,5 руб./авт.

Таблица 1

Расчет среднего значения платы за проезд по Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороге

Показатель	Значение						
	13	18	23	28	33	38	43
Нижняя граница тарифа на интервале, руб.	13	18	23	28	33	38	43
Верхняя граница тарифа на интервале, руб.	18	23	28	33	38	43	48
Средняя величина тарифа на интервале, руб./авт.	15,5	20,5	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5
Средняя величина тарифа на интервале, руб./авт. км	0,31	0,41	0,51	0,61	0,72	0,82	0,92

Таблица 2

Результаты обработки экспертных данных определения наиболее предпочтительной для пользователей Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороги платы за проезд

Уровень соответствия тарифа ожиданиям пользователей	Значение для тарифа, руб./авт.						
	15,5	20,5	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5
Дешевый	100	12	10	–	–	–	–
Оптимальный	–	88	70	60	45	30	20
Высокий	–	–	20	40	55	70	80

Таблица 3

Расчет ожидаемого платежеспособного спроса на Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороге методом экспертных оценок

Средняя величина тарифа на интервале, руб./авт.	СКО	Коэффициент неравномерности	Среднее значение ожидаемого платежеспособного спроса, авт./сут	Срок окупаемости, лет	Чистый дисконтированный доход за период реализации проекта, млн руб.
20,5	2616,22	1,193	13009	9,7	704,12

6. Согласно расчету ожидаемого платежеспособного спроса методом экспертных оценок (табл. 3), величина платы за проезд в размере 20,5 руб./авт., являясь предпочтительной для пользователей НКАД, позволяет получить большую прибыль (704,12 млн руб.) и имеет меньший срок окупаемости (9,7 года), что полностью соответствует требованиям инвестора.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОЖИДАЕМОГО ПЛАТЕЖЕСПОСОБНОГО СПРОСА НА НОВОКУЗНЕЦКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГЕ ПРИ ПОМОЩИ АЛГОРИТМА КОРРЕКТИРОВКИ МАРШРУТОВ

В данной работе предлагается отказаться от определения величины ожидаемого платежеспособного спроса методом экспертных оценок и воспользоваться методикой, приведенной в [16–18], которая содержит алгоритм корректировки маршрутов доставки грузов.

Применение алгоритма для решения задачи многокритериального выбора варианта маршрута позволяет получить решение, максимально удовлетворяющее всем требованиям, заявленным пользователями объектов автодорожного комплекса.

Процедура определения механизма возврата инвестиций в инфраструктурные проекты ГЧП в автодорожном комплексе с оценкой величины ожидаемого платежеспособного спроса при помощи алгоритма корректировки маршрутов представлена на рис. 1.

Корректировку маршрутов доставки грузов с учетом состояния системы распределения ресурсов автодорожного комплекса, решаемую методом анализа иерархий, выполним для автомобиля ГАЗ 330202 000 «ТЕН-НК».

Исходные данные для расчета:

1. Пункт отправления — с. Атаманово, ул. Суворова, д. 18а.

2. Пункт назначения — г. Киселевск, ул. Промышленная, д. 2.

3. Маршрут № 1 протяженностью 100 км включает платный дорожный объект — НКАД, продолжительность движения по маршруту составляет 1 ч 18 мин (рис. 2).

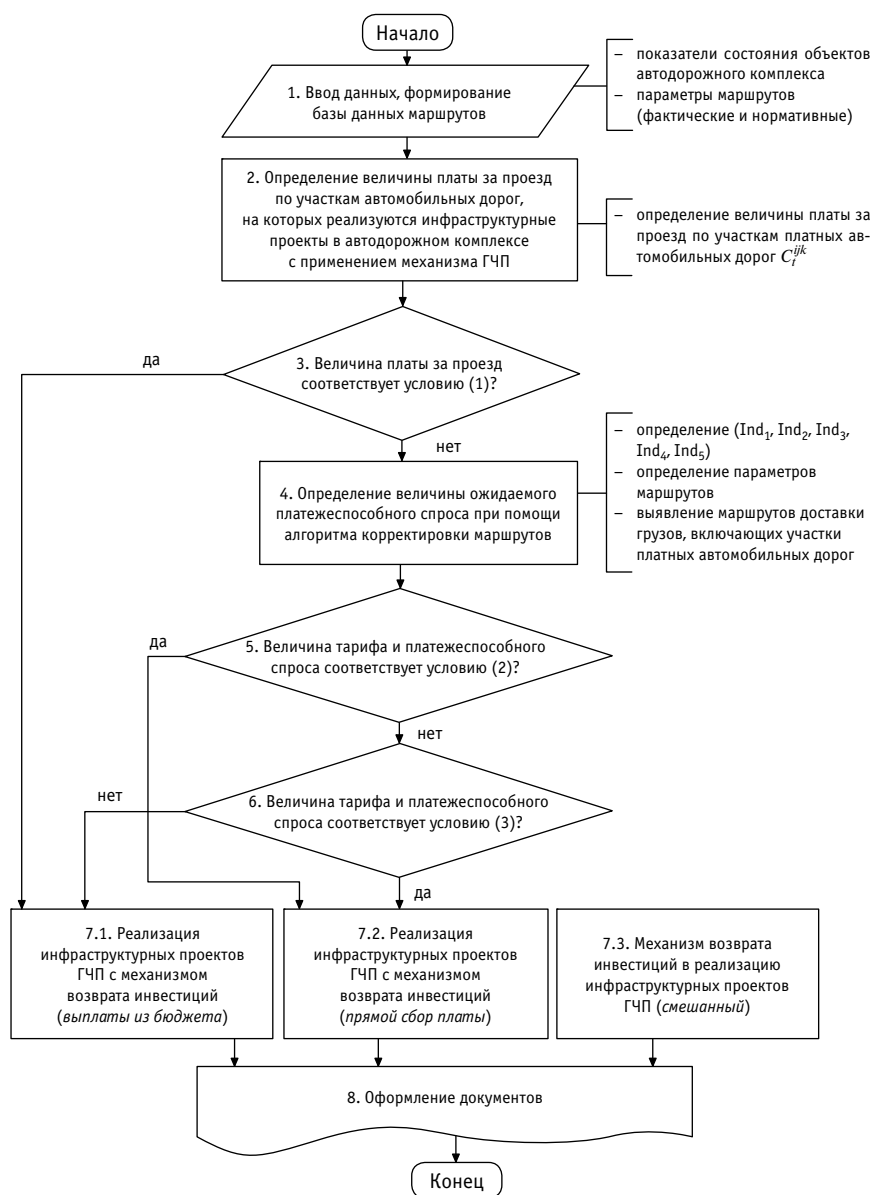


Рис. 1. Процедура выбора механизма возврата инвестиций в инфраструктурные проекты ГЧП в автодорожном комплексе с определением величины ожидаемого платежеспособного спроса при помощи алгоритма корректировки маршрутов

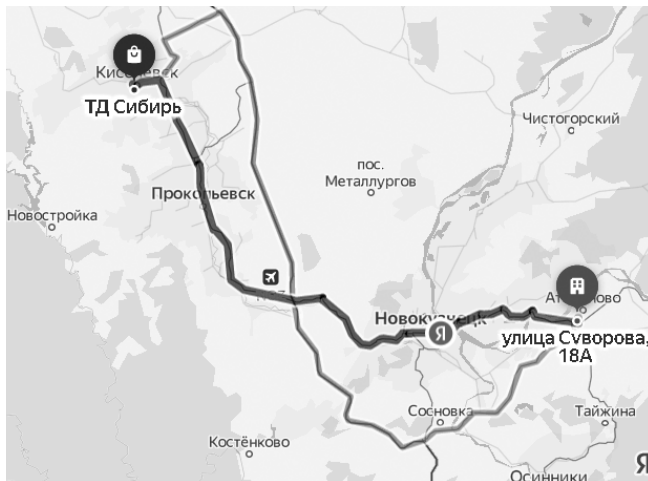


Рис. 2. Схема маршрутов движения

4. Маршрут № 2 (альтернативный) протяженностью 76 км предусматривает движение по улично-дорожной сети г. Новокузнецка и пос. Колачево, включая ул. Куйбышева и ул. Димитрова. Продолжительность движения по маршруту 1 ч 43 мин (см. рис. 2).

5. Маршруты включают участки, не соответствующие нормативным требованиям. Протяженность таких участков на маршруте № 1 составляет 17,3%, на маршруте № 2 — 33,1% от величины маршрута.

6. Перевозки осуществляются ежедневно, количество автомобилей ГАЗ 330202 000 «ТЕН-НК» составляет 3 авт./сут.

7. Стоимость платного проезда по НКАД — 24,0 руб.

Для корректировки маршрута доставки грузов совершаем следующую последовательность шагов.

Определяем векторы приоритетов w_i относительно последнего уровня иерархии и выполняем оценку однородности суждений (табл. 4).

Таблица 4

Исходная матрица попарных сравнений альтернативных проектов по пяти индикаторам

	Ind 1	Ind 2	Ind 3	Ind 4	Ind 5
Ind 1	1	2	2	5	8
Ind 2	1/2	1	2	5	2
Ind 3	1/2	1/2	1	2	2
Ind 4	1/5	1/5	1/2	1	1
Ind 5	1/8	1/2	1/2	1	1

Аналогичным образом обрабатываем матрицы парных сравнений для вышележащих уровней. Данные матрицы построены для того, чтобы оценить предпочтительность элементов определенного иерархического уровня относительно элементов вышележащего уровня.

Выполняем иерархический синтез. Вычисление векторов приоритетов проводим в направлении от нижних уровней к верхним с учетом конкретных связей между элементами, принадлежащими различным уровням. Вычисление осуществляем перемножением соответствующих векторов и матриц:

$$\begin{pmatrix} 0,750 & 0,667 & 0,833 & 0,800 & 0,857 \\ 0,250 & 0,333 & 0,167 & 0,200 & 0,143 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,444 \\ 0,259 \\ 0,148 \\ 0,072 \\ 0,077 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,752 \\ 0,247 \end{pmatrix}.$$

Максимальный элемент в матрице — 0,752. Таким образом, корректировку маршрутов с учетом состояния системы и распределения ресурсов автодорожного комплекса планируется решить за счет организации перевозок по маршруту № 1, имеющему наибольший приоритет эффективности.

Далее корректируем маршруты для крупных и средних автотранспортных предприятий городов Новокузнецка, Междуреченска, Мысков, Прокопьевска, Киселевска, Белова, Кемерово и рассчитываем величину ожидаемого платежеспособного спроса на НКАД после реализации мероприятий по повышению технического уровня и эксплуатационного состояния с применением механизма ГЧП. Итоговое значение составит 10500 авт./сут.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗВРАТА ИНВЕСТИЦИЙ В ПРОЕКТ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ НОВОКУЗНЕЦКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

В рамках данной работы для г. Новокузнецка выполнено моделирование процесса возврата инвестиций в проект повышения технического уровня и эксплуатационного состояния НКАД. При реализации проекта с частным партнером заключается контракт жизненного цикла, по которому выполняются проектирование, реконструкция и последующая эксплуатация объекта. Частично возврат инвестиций и окупаемость проекта предусмотрены за счет получения платы за видеофиксацию случаев нарушения ПДД [8]. Альтернативный маршрут предусматривает движение по улично-дорожной сети г. Новокузнецка и пос. Колачево, включая ул. Куйбышева и ул. Димитрова. Результаты моделирования приведены в табл. 5.

Согласно данным табл. 5, вариант, в котором величина ожидаемого платежеспособного спроса определяется при помощи алгоритма корректировки маршрутов, экономически выгоднее для частного партнера. Его реализация позволяет получить большую прибыль (796,43 млн руб.) и имеет меньший срок окупаемости (8,4 года).

При необходимости снижения нагрузки на улично-дорожную сеть г. Новокузнецка до значений 13000 авт./сут рекомендуется перейти на смешанный механизм возврата инвестиций и выплатами из бюджета компенсировать более 92,31 млн руб. публичному партнеру.

Таблица 5

Результаты моделирования процесса возврата инвестиций в проект повышения технического уровня и эксплуатационного состояния Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороги

Показатель	Определение величины ожидаемого платежеспособного спроса при помощи	
	метода экспертных оценок	алгоритма корректировки маршрутов
Протяженность маршрута, км	49,6/50,0	49,6/50,0
Средняя скорость на маршруте, км/ч	73,8/32,4	73,8/32,4
Величина платы за проезд, руб.	20,50	24,00
Ожидаемый платежеспособный спрос на проезд, авт./сут	13000	10500
Увеличение интенсивности движения, тыс. авт./год	1880,48	967,98
Объем инвестиций, млн руб.	221,2	221,2
Затраты на текущее содержание и ремонт, млн руб./км-год т	57,09	50,92
Срок окупаемости, лет	9,7	8,4
Чистый дисконтированный доход, млн руб.	704,12	796,43
Механизм возврата инвестиций	Прямой сбор платы	Прямой сбор платы

Примечание. В числителе — по платной дороге, в знаменателе — по улично-дорожной сети г. Новокузнецка и пос. Колачево.

Таким образом, реализация предложенной процедуры предусматривает на различных этапах выполнения проекта использование механизмов возврата инвестиций в зависимости от изменения внешних или внутренних факторов и позволяет получить значение платы за проезд, максимально удовлетво-

ряющее всем требованиям, заявленным инвесторами и пользователями объектов автодорожного комплекса.

Алгоритм корректировки маршрутов доставки грузов включает субъективность получаемых оценок и возможность манипулировать параметрами проектов ГЧП при определении ожидаемого платежеспособного спроса на проезд.

Литература

1. Интегральный рейтинг социально-экономического и экономического положения регионов РФ (по итогам 2020 года). URL: <http://civilfund.ru/mat/123> (дата обращения: 09.06.2021).
2. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Кемеровской области до 2035 года : Закон Кемеровской области от 26.12.2018 г. № 12-03. URL: <http://docs.cntd.ru/document/550305101> (дата обращения: 09.06.2021).
3. Паспорт национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» : утв. протоколом президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 24.12.2018 г. № 15. URL: <http://static.government.ru/media/files/rBdyoIr3S9IDP8Q87LXXYaktpKWGc0NY.pdf> (дата обращения: 09.06.2021).
4. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р. URL: <http://government.ru/docs/34297/> (дата обращения: 09.06.2021).
5. Об утверждении программы социально-экономического развития Кемеровской области — Кузбасса до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 06.03.2021 г. № 556-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/JdaK3JTUTv5pCKcPuG4ttgPRv6lnaxuU.pdf> (дата обращения: 09.06.2021).
6. Буйвис В. А., Новичихин А. В. Функционирование и распределение ресурсов автодорожного комплекса: индикаторы, модели и сценарии // Экономика и менеджмент систем управления. 2018. № 2.2 (28). С. 296–303. ISSN 2223–0432.
7. Buyvis V. A., Novichikhin A. V. Algorithm for the selection of public-private partnership projects for planning the resources allocation in

References

1. Integral rating of socio-economic and economic situation of the Russian Federation regions (according to the results of the 2020) [Integral'nyy reyting sotsial'no-ekonomicheskogo i ekonomicheskogo polozheniya regionov RF (po itogam 2020 goda)]. URL: <http://civilfund.ru/mat/123> (access date: 09.06.2021).
2. On the approval of Strategy for socio-economic development of the Kemerovo Region up to 2035 [Ob utverzhdenii Strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Kemerovskoy oblasti do 2035 goda] : Law of the Kemerovo Region dated 26.12.2018 No. 12-0Z. URL: <http://docs.cntd.ru/document/550305101> (access date: 09.06.2021).
3. Passport of the national project «Safe and high-quality roads» [Passport natsional'nogo proekta «Bezopasnye i kachestvennye avtomobil'nye dorogi»] : approved by the report of the General Committee of the Russian Federation Presidential Council on strategic development and national projects, dated 24.12.2018 No. 15. URL: <http://static.government.ru/media/files/rBdyoIr3S9IDP8Q87LXXYaktpKWGc0NY.pdf> (access date: 09.06.2021).
4. On the approval of the Complex plan for modernization and extension of mainline infrastructure for the period up to 2024 [Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda] : Order of the Government of the Russian Federation dated 30.09.2018 No. 2101-r. URL: <http://government.ru/docs/34297/> (access date: 09.06.2021).
5. On the approval of the program on socio-economic development of the Kemerovo Region — the Kuzbass up to 2024 [Ob utverzhdenii programmy sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Kemerovskoy oblasti — Kuzbassa do 2024 goda] : Order of the Government of the Russian Federation dated 06.03.2021 No. 556-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/JdaK3JTUTv5pCKcPuG4ttgPRv6lnaxuU.pdf> (access date: 09.06.2021).
6. Buyvis V. A., Novichikhin A. V. Functioning and distribution resources of the road complex: indicators, models and scenarios [Funksionirovanie i raspredelenie resurov avtodorozhnogo kompleksa: indikatory, modeli i stsenarii] // Economics and management of control systems. 2018. No. 2.2 (28). Pp. 296–303. ISSN 2223-0432.

- road and transport infrastructure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 377. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012028.
8. Министерство экономического развития Российской Федерации. Рекомендации по реализации проектов государственно-частного партнерства. Лучшие практики. URL: <http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/82489feb-7ce4-41bd-8830-be47cf70063c/metodic2612.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=82489feb-7ce4-41bd-8830-be47cf70063c> (дата обращения: 09.06.2021).
 9. Буйвис В. А., Новичихин А. В. Моделирование сценариев повышения технического уровня и эксплуатационного состояния Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороги, реализуемых на основе механизма государственно-частного партнерства // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 4 (68). С. 127–134. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).127–134. ISSN 1813–9108.
 10. Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изменениями и дополнениями) : Федеральный закон от 08.11.2007 г. № 257-ФЗ. URL: <https://base.garant.ru/12157004/> (дата обращения: 09.06.2021).
 11. ОДМ 218.2.017–2011. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации. Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения : распоряжение Росавтодора от 13.07.2012 г. № 505-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094618> (дата обращения: 03.05.2021).
 12. ОДМ 218.4.023–2015. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке эффективности строительства, реконструкции, капитального ремонта и ремонта автомобильных дорог : распоряжение Росавтодора от 10.11.2015 г. № 2106-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420320942> (дата обращения: 03.05.2021).
 13. О плате за проезд транспортных средств по платным автомобильным дорогам общего пользования федерального значения, платным участкам таких автомобильных дорог (в том числе если платным участком автомобильной дороги является отдельное искусственное дорожное сооружение) : Постановление Правительства Российской Федерации от 30.01.2016 г. № 47. URL: <https://sudact.ru/law/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-30012016-n-47/> (дата обращения: 09.06.2021).
 14. О концессионных соглашениях : Федеральный закон от 21.07.2005 г. № 115-ФЗ (с изменениями и дополнениями). URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/12141176/paragraph/34955:1> (дата обращения: 09.06.2021).
 15. О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 13.07.2015 г. № 224-ФЗ (с изменениями и дополнениями). URL: <https://base.garant.ru/71129190/> (дата обращения: 09.06.2021)
 16. Буйвис В. А., Новичихин А. В. Алгоритм корректировки маршрутов доставки грузов с учетом состояния системы распределения ресурсов автодорожного комплекса // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2020. № 6. С. 191–197. ISSN 2311–8342.
 17. Buyvis V. A., Yuryeva E. Yu., Novichikhin A. V. Algorithm for the selection of public-private partnership projects for planning the resources allocation in road and transport infrastructure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Sci. 377 012028.
 18. Буйвис В. А., Новичихин А. В. Методические особенности распределения ресурсов при реализации мероприятий по повышению безопасности улично-дорожной сети г. Новокузнецка // Образование — Наука — Производство : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Чита, 2020. С. 119–125.
 7. Buyvis V. A., Novichikhin A. V. Algorithm for the selection of public-private partnership projects for planning the resources allocation in road and transport infrastructure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 377. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012028.
 8. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. Recommendations on implementation of Public-Private Partnership projects. Best practices [Ministerstvo ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii. Rekomendatsii po realizatsii proektov gosudarstvenno-chastnogo partnerstva. Luchshie praktiki]. URL: <http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/82489feb-7ce4-41bd-8830-be47cf70063c/metodic2612.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=82489feb-7ce4-41bd-8830-be47cf70063c> (access date: 09.06.2021).
 9. Buyvis V. A., Novichikhin A. V. Modeling scenarios for improving the technical level and operational status of the Novokuznetsk belt road implemented on the basis of the public-private partnership mechanism [Modelirovanie stsensariy povysheniya tekhnicheskogo urovnya i ekspluatatsionnogo sostoyaniya Novokuznetskoy kol'tsevoy avtomobil'noy dorogi, realizuemykh na osnove mekhanizma gosudarstvenno-chastnogo partnerstva] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2020. No. 4 (68). Pp. 127–134. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).127–134. ISSN 1813–9108.
 10. On roads and road operation in the Russian Federation and on amending of separate laws of the Russian Federation (revised and expanded) [Ob avtomobil'nykh dorogakh i o dorozhnoy deyatelnosti v Rossiyskoy Federatsii i o vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii (s izmeneniyami i dopolneniyami)] : Federal law of the Russian Federation dated 08.11.2007. No. 257-FZ. URL: <https://base.garant.ru/12157004/> (access date: 09.06.2021).
 11. ISRG 218.2.017-2011. Industry-specific road guidance. Guidelines. Design, construction and operation of roads with low volume traffic [ODM 218.2.017-2011. Otrasevyy dorozhnyy metodicheskiy dokument. Metodicheskie rekomendatsii. Proektirovaniye, stroitel'stvo i ekspluatatsiya avtomobil'nykh dorog s nizkoy intensivnost'yu dvizheniya] : Order of the Rosavtodor dated 13.07.2012 No. 505-r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094618> (access date: 03.05.2021).
 12. ISRG 218.4.023-2015. Industry-specific road guidance. Guidelines on assessment of efficiency of construction, reconstruction, overhaul and repair of roads [ODM 218.4.023-2015. Otrasevyy dorozhnyy metodicheskiy dokument. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti stroitel'stva, rekonstruktsii, kapital'nogo remonta i remonta avtomobil'nykh dorog] : Order of the Rosavtodor dated 10.11.2015 No. 2106-r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420320942> (access date: 03.05.2021).
 13. On fairs for movement of vehicles on federal-aid toll roads of public service, toll sections of such roads (including if the toll section of the road is the separate artificial construction) [O plate za proezd transportnykh sredstv po platnym avtomobil'nyim dorogam obshhego pol'zovaniya federal'nogo znacheniya, platnym uchastkam takikh avtomobil'nykh dorog (v tom chisle esli platnym uchastkom avtomobil'noy dorogi yavlyaetsya otdel'noe iskusstvennoe dorozhnoe sooruzhenie)] : the Order of the Government of the Russian Federation dated 30.01.2016 No. 47. URL: <https://sudact.ru/law/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-30012016-n-47/> (access date: 09.06.2021).
 14. On concession agreements [O kontsessionnykh soglasheniyakh] : Federal law of the Russian Federation dated 21.07.2005 No. 115-FZ (with changes and additions). URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/12141176/paragraph/34955:1> (access date: 09.06.2021).
 15. On Public-Private Partnership, municipal-private partnership in the Russian Federation and modifications of separate legislative acts of the Russian Federation [O gosudarstvenno-chastnom partnerstve, munitsipal'no-chastnom partnerstve v Rossiyskoy Federatsii i vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii] : Federal law of the Russian Federation dated 13.07.2015 No. 224-FZ (with changes and additions). URL: <https://base.garant.ru/71129190/> (access date: 09.06.2021)
 16. Buyvis V. A., Novichikhin A. V. Algorithm for adjustment of delivery routes with the consideration for condition of system for distributing resources of road complex [Algoritm korrektyrovki marshrutov dostavki gruzov s uchetoм sostoyaniya sistemy raspredeleniya resursov avtodorozhnogo kompleksa] // Scientific technologies of development and use of mineral resources. 2020. No. 6. P. 191–197. ISSN 2311–8342.
 17. Buyvis V. A., Yuryeva E. Yu., Novichikhin A. V. Algorithm for the selection of public-private partnership projects for planning the resources allocation in road and transport infrastructure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Sci. 377 012028.
 18. Buyvis V. A., Novichikhin A. V. Instructional peculiarities of resources distribution at realization of measures on increase of safety of the Novokuznetsk network of streets [Metodicheskie osobennosti raspredeleniya resursov pri realizatsii meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti ulichno-dorozhnoy seti g. Novokuznetska] // Education — Science — Production : proceedings of the 4th All-Russian research and practice conference. Chita, 2020. Pp. 119–125.

УДК 629.083:725.38

Александр Викторович Соколов, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт» Ярославского государственного технического университета (ЯГТУ), Ярославль, Россия,

Александр Владимирович Маркелов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Ярославского государственного технического университета (ЯГТУ), Ярославль, Россия,

Валерий Александрович Масленников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт и автомобильные дороги» Ивановского государственного политехнического университета (ИВГПУ), Иваново, Россия,

Дмитрий Алексеевич Устинов, магистрант кафедры «Транспорт и автомобильные дороги» Ивановского государственного политехнического университета (ИВГПУ), Иваново, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСОБРАЗНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТНЫХ РАСЧЕТОВ ДОРОЖНЫХ АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Alexander Viktorovich Sokolov, PhD in Engineering, Head of Automobile Transport Department, Yaroslavl State Technical University (YSTU), Yaroslavl, Russia,

Alexander Vladimirovich Markelov, PhD in Engineering, Associate Professor, Automobile Transport Department, Yaroslavl State Technical University (YSTU), Yaroslavl, Russia,

Valeriy Alexandrovich Maslennikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport and Automobile Roads Department, Ivanovo State Polytechnic University (ISPU), Ivanovo, Russia,

Dmitriy Alexeevich Ustinov, graduate student, Transport and Automobile Roads Department, Ivanovo State Polytechnic University (ISPU), Ivanovo, Russia

Experimental substantiation of expediency for improvement of method for project calculations of gas stations

Аннотация

В основе методики обоснования главного параметра автозаправочных станций (АЗС), нашедшей свое отражение в СП 34.13330.2012 и РСН 62–86, лежит детерминированный подход, в соответствии с которым мощность станции по числу заправок в сутки однозначно определяется среднесуточной интенсивностью движения автомобилей на дороге в месте ее расположения, расстоянием пробега, а также расходом топлива и вместимостью топливных баков.

Установлено, что такая зависимость действительно существует, но носит не детерминированный, а вероятностно-статистический характер, т.е. для решения данной задачи требуется использование соответствующих математических методов. В связи с этим цель статьи заключается в экспериментальной проверке результатов теоретических исследований по разработке новой методики обоснования проектирования дорожных АЗС, выполненных на основе положений и математического аппарата теории массового обслуживания, а также сравнительный анализ стандартизованной и предлагаемой методик.

В основу разработки новой методики положены аналитический аппарат теории разомкнутых многоканальных систем массового обслуживания с ограничением на длину очереди, теория надежности и экономико-математическое моделирование. Исследования показали, что синтез перечисленных методов дает положительный результат. Разработанный на их основе метод обеспечивает приемлемое по точности аналитическое определение числа заездов различных транспортных средств на заправку, что в конечном счете гарантирует высокую достоверность определения потребности проектируемой АЗС в топливораздаточных колонках, числе и вместимости резервуаров для хранения топлива.

Использование предлагаемого метода расчета числа заездов автомобилей на дорожную автозаправочную станцию позволит повысить достоверность технологического расчета при разработке бизнес-планов строительства, а также при технико-экономическом обосновании и проектировании АЗС.

Ключевые слова: дорожная автозаправочная станция, число заездов на заправку, теория массового обслуживания.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-86-89

Summary

In the basis of a method for substantiating of a main parameter of gas stations lays a deterministic approach, according to which a capacity of the station on the number of stoppings in a day is determined by the daily average intensity of car traffic on a road in the place of its location, length of a run, fuel consumption and capacity of fuel tanks.

It is established that such dependence really exists, but it is not deterministic, it is probabilistic and statistical in nature. So, for the solution of the task it is necessary to use appropriate mathematical methods. Consequently, the purpose of the paper is in an experimental test of results of a theoretical research on development of a new method for design substantiation of gas stations executed on the basis of a queueing theory mathematical apparatus, a comparative analysis of the standard and the proposed methods.

The new method is based on an analytical apparatus of the queueing theory with the limit on the queue length, reliability theory, economic and mathematical modeling. Studies showed that a synthesis of the specified methods gives a positive result. A method developed on their basis provides an acceptable on accuracy analytical determination of number of various vehicles stoppings for refuelling that guarantees a high reliability of determination for a number of fuel dispensers, a number and capacity of fuel storage tanks on a designed gas station.

The use of the proposed method for calculation of the number of stoppings on the gas station will increase the reliability of technological calculation at development of construction business plans and at feasibility studies and designing of gas stations.

Keywords: gas station, number of stoppings at gas station, queueing theory.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации на сети дорог общего пользования федерального, регионального, межмуниципального и местного значения действует 29735 автозаправочных станций (АЗС). С учетом общей протяженности этой дорожной сети, равной 1507750,6 км, средняя плотность размещения АЗС — 1 станция на каждые 50,7 км. В наиболее развитых странах Западной Европы, таких как Англия, Германия и Франция, данный показатель составляет 30–40 км, причем работа АЗС отличается высокой эффективностью, в то время как в нашей стране их среднегодовая загрузка не превышает 30% [1]. По мнению ряда экспертов, основная причина сложившейся ситуации заключается в несовершенстве используемой методологии проектных расчетов АЗС, что не позволяет учитывать ни высокую сезонную и суточную неравномерность заездов транспортных средств (ТС) на автозаправочные станции, ни вероятностный характер (случайность) самого факта заезда [2–5]. Именно поэтому была разработана новая методика проектных расчетов станций [6–11]. Ее главной составляющей является вероятностный метод расчета числа заездов транспортных средств на АЗС, который должен быть подвергнут экспериментальной проверке. Цель исследования, представленного в данной статье, — сравнительный анализ стандартизированной и предлагаемой методик для выяснения причин низкой загрузки основного технологического оборудования АЗС.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах [6–11] изложено основное содержание методики проектных расчетов дорожных АЗС с использованием математического аппарата теории массового обслуживания. В соответствии с предлагаемой методикой расчетное число заездов ТС на АЗС с заданным уровнем вероятности $[P_H]$ определяется по формуле [7, 8, 12, 13]

$$R_k(t) = 1 - \sum_{k=0}^{k-1} \frac{a^k}{k!} \cdot e^{-a} \geq [P_H], \quad (1)$$

где $R_k(t)$ — вероятность того, что в течение времени t на АЗС заедет на заправку не менее k транспортных средств, $k = 1, 2, \dots, k$;
 a — параметр закона Пуассона;
 e — основание натурального логарифма.
 Величина параметра a определяется из выражения [11, 14]

$$a = (1 - e^{-U \cdot R_0}) \cdot \delta_i \cdot \delta_{ij} \cdot \frac{I \cdot R_0}{V_i \cdot T} \cdot (1 - P_3), \quad (2)$$

где U — интенсивность расхода топлива, км⁻¹;
 R_0 — ширина зоны (зона) обслуживания АЗС, км;
 δ_i — доля ТС i -го вида в потоке транспорта;
 δ_{ij} — доля ТС i -го вида, расходующих j -ю марку топлива;
 I — среднегодовая суточная интенсивность движения транспорта по дороге в месте строительства АЗС, ед./сут;
 V_i — средняя скорость движения ТС i -го вида в транспортном потоке, км/ч;
 T — расчетный период времени, $T = 24$ ч;

P_3 — вероятность заправки ТС на других АЗС, расположенных на данной дороге.

Интенсивность расхода топлива в выражении (2) определяется следующим образом [6, 8, 15–18]:

$$U = \frac{0,01 \cdot g_i}{Q_i \cdot \varepsilon_i}, \quad (3)$$

где g_i — средний расход топлива ТС i -го вида, л/100 км;

Q_i — средняя номинальная вместимость топливного бака ТС i -го вида, л;

ε_i — коэффициент использования номинальной вместимости бака ТС i -го вида при заезде на заправку.

Суточное число заездов ТС на АЗС, согласно стандартизированной методике расчета, определяется по формуле [19]

$$S = (S^\Gamma + S^Л + S^А) \cdot \varepsilon_H, \quad (4)$$

где S^Γ , $S^Л$, $S^А$ — суточное число заездов грузовых, легковых автомобилей и автобусов, ед./сут;

ε_H — средний коэффициент неравномерности суточной реализации топлива на АЗС в течение месяца.

При этом суточное число заездов S^Γ , $S^Л$, $S^А$ определяется следующим образом [19]:

$$S^\Gamma = \frac{l \cdot I^\Gamma \cdot g^\Gamma}{100 \cdot Q^\Gamma \cdot \varepsilon^\Gamma}; \quad S^Л = \frac{l \cdot I^Л \cdot g^Л}{100 \cdot Q^Л \cdot \varepsilon^Л}; \quad S^А = \frac{l \cdot I^А \cdot g^А}{100 \cdot Q^А \cdot \varepsilon^А}, \quad (5)$$

где l — протяженность участка дороги с определенной интенсивностью движения, км;

I^Γ , $I^Л$, $I^А$ — интенсивность движения грузовых, легковых автомобилей и автобусов на данном участке дороги, ед./сут;

g^Γ , $g^Л$, $g^А$ — норма расхода топлива на 100 км пробега для грузовых, легковых автомобилей и автобусов, л/100 км;

Q^Γ , $Q^Л$, $Q^А$ — средняя вместимость топливных баков грузовых, легковых автомобилей и автобусов, л;

ε^Γ , $\varepsilon^Л$, $\varepsilon^А$ — средний коэффициент использования вместимости бака грузовыми, легковыми автомобилями и автобусами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чтобы выяснить причины низкой загрузки технологического оборудования АЗС, выполнен расчет числа заездов ТС по математическим моделям (1) и (4) с вероятностью $[P_H] = 0,95$ для участка дороги протяженностью $l = 100$ км со среднегодовой интенсивностью движения $I = 20$ тыс. авт./сут. Прочие показатели, входящие в состав указанных моделей, приведены в табл. 1 [7, 20–23], результаты расчетов — в табл. 2 [7].

Расчеты по математическим моделям (1) и (4) сравнивали с результатами экспериментов, полученными путем обработки данных по действующей на этом участке дороги АЗС за последние два года (см. табл. 2). Сравнение показало, что использование методики, рекомендованной РСН 62–86, приводит к значительному завышению числа заездов ТС на АЗС. Причем по общему числу заездов превышение над экспериментальными данными составило 2,90 раза, по числу заездов ТС

на заправку бензином — 2,87, дизельным топливом — 3,17, по отдельным маркам топлива — 2,50–2,90 раза. Кроме того, при определении числа топливораздаточных колонок (ТРК) в стандартизированной методике рекомендуется увеличивать результаты расчета на 30–40 % во избежание возможных простоев ТС из-за неисправности ТРК [17].

Напротив, результаты расчетов числа заездов ТС на АЗС, выполненных по предлагаемой методике, больше совпадают с экспериментальными данными. Так, по общему числу заездов ТС на АЗС расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 2,73 %, по числу заездов на заправку бензином — 2,68 %, дизельным топливом — 3,17 %. По отдельным маркам топлива расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 2,97–12,19 %.

Таким образом, метод расчета числа заездов ТС на дорожную АЗС с использованием математического аппарата теории массового обслуживания более эффективен, поскольку обеспечивает лучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных [7, 24, 25].

По результатам сравнительного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Основная причина низкой загрузки технологического оборудования действующих АЗС — несоответствие расчетного и фактического числа заездов ТС на заправку. Рассчитанное по стандартизированной методике суточное число заездов в 2,87–3,17 раза выше фактических среднегодовых значений.

Исходные данные для расчета числа заездов ТС на АЗС

Показатели	Среднее значение показателей		
	Грузовые автомобили	Легковые автомобили	Автобусы
	Б/Д	Б/Д	Б/Д
Структура потока ТС δ_i , %	15	80	5
Доля ТС i -го вида, расходующих j -ю марку топлива	0,32/0,68	0,94/0,06	0,80/0,20
Расход топлива g , л/100 км	22,3/20,0	9,0/9,6	27,1/5,5
Средняя скорость движения ТС V_i , км/ч	76	93	68
Средняя вместимость топливного бака Q_i , л	125/243	56/80	103/146
Средний коэффициент использования вместимости топливного бака ε_i , доля	0,55/0,63	0,58/0,56	0,56/0,57

Примечание. Б — бензиновый двигатель, Д — дизельный двигатель.

Таблица 1

Расчетное и опытное число заездов ТС на АЗС

Вид ТС	Вид топлива	Число заездов ТС на АЗС, ед./сут		
		Стандартная методика (РСН 62–86)	Предлагаемая методика	Экспериментальные данные
Грузовые автомобили	Бензин	233	82	93
Легковые автомобили		3125	1044	1076
Автобусы		282	108	99
Всего		3640	1234	1268
Грузовые автомобили	Дизельное топливо	200	70	67
Легковые автомобили		154	36	41
Автобусы		46	16	18
Всего		400	122	126
Общее число заездов ТС на АЗС	—	4040	1356	1394

2. Требование стандартизированной методики на 30–40 % увеличивать число ТРК, чтобы из-за их неисправности предотвращать возможные простои ТС, является необоснованным.

3. Точность проектного расчета может существенно повысить при помощи использования математического аппарата теории массового обслуживания.

Литература

1. Техническая оснащенность и персонал в системах нефтепродуктообеспечения / В. В. Анферов, В. Т. Коваленко, А. Н. Ременцов [и др.] : учебное пособие. Москва : Метранпж, 2006. 448 с.
2. Безродный А. А., Резчиков А. Ф. Модели структур и алгоритмы управления автозаправочными станциями. Саратов : СГТУ, 2004. 249 с.
3. Безродный А. А., Иващенко В. А., Резчиков А. Ф. Оптимизация структур сетей автозаправочных станций на основе использования современных информационных технологий // Высокие технологии — путь к прогрессу : сборник научных трудов. Саратов : Научная книга, 2003. С. 64–72.
4. Куколкин А. И. Системный подход к повышению эффективности функционирования объектов обеспечения автотранспорта нефтепродуктами : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2007. 137 с.
5. Зайцев В. В. Автозаправочная станция как система массового обслуживания с ограничением времени пребывания в ней // Автомобильные дороги. 2002. № 4. С. 36–40. ISSN 0207–3102.

References

1. Technical equipment and personnel in oil product supply systems [Tekhnicheskaya osnashhennost' i personal v sistemakh nefteproduktoobespecheniya] / V. V. Anferov, V. T. Kovalenko, A. N. Rementsov [et al.] : textbook. Moscow, 2006. 448 p.
2. Bezrodnyy A. A., Rezchikov A. F. Models of structures and algorithms of gas station management [Modeli struktur i algoritmy upravleniya avtozapravochnymi stantsiyami]. Saratov : SSTU, 2004. 249 p.
3. Bezrodnyy A. A., Ivashchenko V. A., Rezchikov A. F. Optimization of the structure of gas station networks based on the use of modern information technologies [Optimizatsiya struktur setey avtozapravochnykh stantsiy na osnove ispol'zovaniya sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy] // High technologies — the way to progress : collection of scientific works. Saratov : Science Book, 2003. Pp. 64–72.
4. Kukulkin A. I. A systematic approach to improving the efficiency of the functioning of objects for providing motor transport with petroleum products [Sistemnyy podkhod k povysheniyu effektivnosti funktsionirovaniya ob'ektov obespecheniya avtotransporta nefteproduktami] : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2007. 137 p.

6. Масленников В. А., Сметанин А. В. Обоснование мощности и места строительства дорожных автозаправочных станций // Вестник научно-промышленного общества. Москва : АЛЕВ-В, 2011. Вып. 14. С. 87–92.
7. Масленников В. А., Сметанин А. В. Исследование числа заездов транспортных средств на дорожные автозаправочные станции // Информационная среда вуза : материалы XIX Международной научно-технической конференции. Иваново : ИГАСУ, 2012. С. 357–360.
8. Масленников В. А., Сметанин А. В. Математическая модель и алгоритм решения задачи оптимального размещения дорожных АЗС // Вестник научно-промышленного общества. Москва : АЛЕВ-В, 2012. Вып. 18. С. 48–50.
9. Левин Р. Ю., Масленников В. А. Математическая модель оптимизации планировочного решения автозаправочной станции // Журнал автомобильных инженеров. 2016. № 1 (96). С. 34–35. ISSN 2073–9133.
10. Левин Р. Ю., Масленников В. А., Сметанин А. В. Метод технологического расчета автозаправочных станций // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях : сборник научных трудов 4-й Международной научно-технической конференции. Курск : ЮЗГУ, 2014. Т. 1. С. 337–339.
11. Масленников В. А., Сметанин А. В. Основы методики проектирования оптимальной структуры дорожных автозаправочных станций // Труды Международной научно-технической конференции «Ауэзовские чтения-10». Шымкент : ЮКГУ, 2011. Т. 1. С. 66–69.
12. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Москва : Наука, 1988. 480 с.
13. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. Москва : Ком книга, 2005. 397 с.
14. Безопасность и надежность технических систем / Л. Н. Александровская, И. З. Аронов, В. И. Круглов [и др.] : учебное пособие. Москва : Университетская книга ; Логос, 2008. 376 с.
15. Масуев М. А. Проектирование предприятий автомобильного транспорта : учебное пособие. Москва : Академия, 2007. 224 с.
16. Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте : методические рекомендации : приложение к распоряжению Минтранса России от 14.03.2008 г. № АМ-23-р. Москва : Минтранс РФ, 2008. 81 с.
17. Инструкция по проведению экономических изысканий для проектирования автомобильных дорог. ВС11 42 87. Москва : Минтрансстрой СССР, 1980. 30 с.
18. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах : отраслевой дорожный методический документ (взамен ВСН 2586). Москва : Минтранс СССР ; Росавтодор, 2002. 252 с.
19. Методические указания по определению состава объектов автосервиса и их размещения на автомобильных дорогах общегосударственного и республиканского значения в РСФСР. РСН 62–86 / Гипродор НИИ. Москва : ЦБНТИ Минавтотранспорта РСФСР, 1987. 36 с.
20. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Москва : Мир, 1980. 486 с.
21. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Москва : Мир, 1985. 272 с.
22. Вентцель Е. С. Исследование операций : задачи, принципы, методология. Москва : Наука, 1980. 208 с.
23. Данко П. Е., Попов А. Г., Кожевникова Т. Я. Высшая математика в управлениях и задачах : учебное пособие. Москва : Высшая школа, 1986. 415 с.
24. Левин Р. Ю., Масленников В. А., Сметанин А. В. Интегральный критерий качества проекта автозаправочной станции // Инженерные и социальные системы : сборник научных трудов ИВГПУ. Иваново, 2016. Вып. 1. С. 131–139.
25. Саркисов В. В. Разработка методики формирования корпоративной сети автозаправочных станций на автомагистралях : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2003. 152 с.
5. Zaytsev V. V. Gas station as a system of mass service with a limited time of stay in it [Avtozapravochnaya stantsiya kak sistema massovogo obsluzhivaniya s ogranicheniem vremeni prebyvaniya v ney] // Automobile Roads. 2002. No. 4. Pp. 36–40. ISSN 0207-3102.
6. Maslennikov V. A., Smetanin A. V. Justification of the capacity and place of construction of road filling stations [Obosnovanie moshhnosti i mesta stroitel'stva dorozhnykh avtozapravochnykh stantsiy] // Bulletin of the Scientific and Industrial Society. Moscow : ALEV-V, 2011. Issue 14. Pp. 87–92.
7. Maslennikov V. A., Smetanin A. V. Study of the number of vehicle arrivals at road filling stations [Issledovanie chisla zaездov transportnykh sredstv na dorozhnye avtozapravochnye stantsii] // Information environment of the university : proceedings of the 19th International scientific and technical conference. Ivanovo : ISACU, 2012. Pp. 357–360.
8. Maslennikov V. A., Smetanin A. V. Mathematical model and algorithm for solving the problem of optimal placement of road gas stations [Matematicheskaya model' i algoritm resheniya zadachi optimal'nogo razmeshheniya dorozhnykh AZS] // Bulletin of Scientific and Industrial Society. Moscow : ALEV-V, 2012. Issue 18. Pp. 48–50.
9. Levin R. Yu., Maslennikov V. A. Mathematical model of optimization planning solutions of filling stations [Matematicheskaya model' optimizatsii planirovonnogo resheniya avtozapravochnoy stantsii] // AAI Journal. 2016. No. 1 (96). Pp. 34–35. ISSN 2073-9133.
10. Levin R. Yu., Maslennikov V. A., Smetanin A. V. Method of technological calculation of gas stations [Metod tekhnologicheskogo rascheta avtozapravochnykh stantsiy] // Innovations, quality and service in technique and technologies : collection of scientific papers of the 4th International scientific and technical conference. Kursk : SWSU, 2014. Vol. 1. Pp. 337-339.
11. Maslennikov V. A., Smetanin A. V. Fundamentals of designing the optimal structure of the road gas stations [Osnovy metodiki proektirovaniya optimal'noy struktury dorozhnykh avtozapravochnykh stantsiy] // Proceedings of International scientific and technical conference «Auezov readings-10». Shymkent : SKU, 2011. Vol. 1. Pp. 66–69.
12. Venttsel E. S., Ovcharov L. A. Probability theory and its engineering applications [Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya]. Moscow : Science, 1988. 480 p.
13. Gnedenko B. V., Kovalenko I. N. Introduction to the theory of mass about the service [Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya]. Moscow, 2005. 397 p.
14. Safety and reliability of technical systems [Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh sistem] / L. N. Alexandrovskaya, I. Z. Aronov, V. I. Kruglov [et al.] : textbook. Moscow : University book ; Logos, 2008. 376 p.
15. Masuev M. A. Design of automobile transport enterprises [Proektirovanie predpriyatiy avtomobil'nogo transporta] : textbook. Moscow : Academy, 2007. 224 p.
16. Fuel and lubricants consumption standards in road transport [Normy raskhoda topliv i smazochnykh materialov na avtomobil'nom transporte] : guidelines : appendix to the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 14.03.2008 No. AM-23-r. Moscow : Ministry of Transport of the Russian Federation, 2008. 81 p.
17. Instructions for conducting economic surveys for the design of highways. VS11 42 87 [Instruktsiya po provedeniyu ekonomicheskikh izyskaniy dlya proektirovaniya avtomobil'nykh dorog. VS11 42 87]. Moscow, 1980. 30 p.
18. Guidelines for ensuring traffic safety on motor roads [Rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh] : branch road methodological document (instead of VSN 2586). Moscow, 2002. 252 p.
19. Guidelines for determining the composition of objects of motor transport and their placement on highways of national and republican significance in the RSFSR. RSN 62–86 [Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu sostava ob'ektov avto-servisa i ikh razmeshheniya na avtomobil'nykh dorogakh obshhegosudarstvennogo i respublikanskogo znacheniya v RSFSR. RSN 62–86]. Moscow, 1987. 36 p.
20. Johnson N., Lyon F. Statistics and planning of experiments in engineering and science [Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke]. Moscow : World, 1980. 486 p.
21. Taylor J. Introduction to error theory [Vvedenie v teoriyu oshibok]. Moscow : World, 1985. 272 p.
22. Venttsel E. S. Operation research: tasks, principles, methodology [Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya]. Moscow : Science, 1980. 208 p.
23. Danko P. E., Popov A. G., Kozhevnikova T. Ya. Higher mathematics in management and tasks [Vysshaya matematika v upravleniyakh i zadachakh] : textbook. Moscow : Higher School, 1986. 415 p.
24. Levin R. Yu., Maslennikov V. A., Smetanin A. V. Integral criterion of the quality of the project of a gas station [Integral'nyy kriteriy kachestva proekta avtozapravochnoy stantsii] // Engineering and social systems : collection of scientific works of ISPU. Ivanovo, 2016. Issue 1. Pp. 131–139.
25. Sarkisov V. V. Development of a methodology for the formation of a corporate network of gas stations on motorways [Razrabotka metodiki formirovaniya korporativnoy seti avtozapravochnykh stantsiy na avtomagistralyakh] : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2003. 152 p.

УДК 629.4.027.434:625.144.1

Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Евгений Сергеевич Юдт, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Антон Александрович Францевич, инженер-технолог ООО «Тяговые Компоненты», Екатеринбург, Россия,

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ КИНЕТИЧЕСКОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ КОЛЕСА НА КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ

Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Evgeniy Sergeevich Yudt, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Anton Alexandrovich Frantskevich, Process Engineer, Tyagovye Komponenty LLC, Ekaterinburg, Russia

Influence of kinetic slip speed of a wheel on a wheel-rail friction coefficient

Аннотация

Рассмотрено влияние скорости проскальзывания колеса относительно рельса на коэффициент сцепления локомотива. Уточнена физическая природа сцепления колеса с рельсом. Выполнен сравнительный анализ изменения коэффициента сцепления в зависимости от состояния рельс. Выявлены последствия избыточного проскальзывания колеса.

Ключевые слова: коэффициент сцепления, скорость проскальзывания, упругая деформация, локомотив.

Summary

The paper considers an influence of slip speed of a wheel in relation to a rail on friction coefficient of a locomotive. The authors have refined the physical nature of wheel-rail friction. They have also carried out a comparative analysis of friction coefficient change depending on condition of rails. As a result, the authors have revealed the consequences of the excess wheel slip.

Keywords: friction coefficient, slip speed, elastic contraction, locomotive.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-90-92

В зависимости от различных условий эксплуатации приоритетными становятся те или иные показатели локомотива. Например, в нормальных условиях наиболее важны энергоэффективность и ресурс. При трогании поезда с места и движении на расчетных и критических подъемах, особенно в сложных погодных условиях, важнее становятся тяговые свойства.

Исследования коэффициента сцепления колес с рельсами [1–4] показывают его значительное, быстрое и плохо предсказуемое изменение в процессе качения колеса даже в нормальных условиях. В сложных условиях (увлажнение рельсов, загрязнение, в том числе угольной пылью и смазочными материалами) изменения коэффициента сцепления становятся непредсказуемыми, особенно при проскальзывании колеса (срыве сцепления). До настоящего времени нет полного объяснения всех физических явлений, происходящих в зоне контакта «колесо — рельс».

Величина физического коэффициента сцепления зависит от скорости относительного проскальзывания колеса по рельсу в точке контакта. Эту зависимость можно разделить на три характерных участка. Приведенная на рис. 1 зависимость коэффициента сцепления k_c от скорости проскальзывания колеса dv_{sk} относительно рельса, полученная по результатам исследований электровоза Europrinter 127 номер 001 при скорости движения 36 км/ч, наглядно показывает деление на характерные участки [3].

На рис. 2 представлены графики, показывающие зависимость коэффициента сцепления на сухих и влажных рельсах от скорости проскальзывания колеса относительно рельса, полученные по результатам исследований локомотива SD45X при скорости движения 16–32 км/ч.

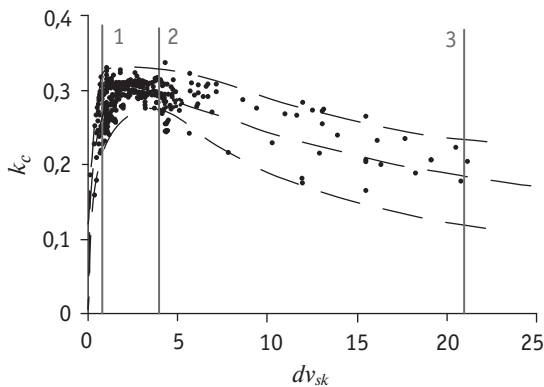


Рис. 1. Зависимость коэффициента сцепления k_c от скорости проскальзывания колеса dv_{sk} относительно рельса для электровоза Europrinter: 1–3 — участки кривых

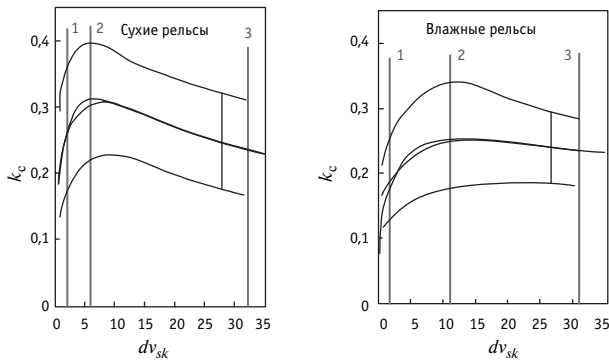


Рис. 2. Зависимость коэффициента сцепления k_c от скорости проскальзывания колеса dv_{sk} относительно рельса для локомотива SD45X [3]: 1–3 — участки кривых

Как видно из рис. 1 и 2, на отрезках 0–1 кривых под действием приложенной силы тяги в зоне контакта колеса и рельса возникает упругая деформация сдвига материалов. Основные физические явления в этой зоне — адгезия, зацепление микронеровностями и упругая деформация. При наличии загрязнений контакт колеса с рельсом происходит через тонкую прослойку загрязнителя, что изменяет адгезию и зацепление микронеровностями, но из-за малой толщины прослойки величина упругой деформации существенно измениться не может. Поэтому характер отрезка 0–1 кривой в основном определяется формой и материалами колеса и рельса и остается достаточно постоянным [4, 5].

Участок 1–2 кривых переходный, и именно здесь коэффициент сцепления достигает максимальных значений. При этом точка максимального коэффициента сцепления непрерывно перемещается как по вертикали, так и по горизонтали.

На участке 2–3 кривых в дополнение к упругой деформации происходит обычное (кинематическое) проскальзывание. С увеличением скорости проскальзывания в зоне контакта нарастает выделение тепла, и в конце участка из-за оплавления материалов скольжение становится полужидким.

Расход электроэнергии тяговым приводом зависит от потребляемой мощности, которая без учета потерь в силовой установке определяется следующим образом:

$$P = F_T \cdot (v + dv_{sk}) = F_T \cdot v + F_T \cdot dv_{sk}, \quad (1)$$

где F_T — сила тяги, Н;

v — скорость движения, м/с;

dv_{sk} — скорость проскальзывания колеса, м/с.

Первое слагаемое в выражении (1) — это мощность, затрачиваемая на движение поезда. Второе слагаемое — мощность, затрачиваемая на нагрев и износ в зоне контакта «колесо — рельс». По данным [6], износ рельсов подчиняется закономерности

$$e = (1 + 900 \cdot dv_{sk}/v) \cdot k \cdot q/D_k, \quad (2)$$

где k — коэффициент, учитывающий материал колеса и рельса;

q — нагрузка на ось, т;

D_k — диаметр колеса, м.

Из выражения (2) следует, что при увеличении проскальзывания износ рельсов увеличивается примерно пропорционально мощности, выделяемой в зоне контакта «колесо — рельс».

Результаты исследований показывают, что на увлажненных и загрязненных рельсах коэффициент сцепления имеет меньшее значение и достигает максимума при большей скорости проскальзывания, чем на чистых и сухих. Очевидно, что избыточное кинематическое проскальзывание колеса ухудшает все показатели силовой установки электровоза. В то же время в сложных условиях (при загрязнении рельсов), если увеличить скорость проскальзывания (не допуская избыточного значения), то за счет повышенного расхода энергии и повышенного износа колес и рельсов появляется возможность увеличить тяговые свойства электровоза.

Избыточное кинематическое проскальзывание вызывает образование волнообразного износа рельса, в результате которого возникают динамические нагрузки как на подвижной состав, так и на путь [7–9].

Таким образом, результаты исследований, изложенные в данной статье и в работах [1–4], позволяют по-новому представить и понять характеристику сцепления колесных пар с рельсами в режиме тяги, а также изучить не только развитие, но и ликвидацию боксования. Кроме того, появляется возможность оценивать эффективность противобоксовочных систем, а следовательно, находить пути увеличения тяговых свойств локомотивов.

Литература

1. Минов Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. Москва : Транспорт, 1965. 267 с.
2. Меншутин Н. Н. Зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары // Вестник ВНИИЖТ. 1960. № 7. С. 20–25. ISSN 2223–9731.
3. Engel B., Beck H. P., Alders J. Verschleissreduzierende Rad-schlupfregelung mit hoher Kraftschlussausnutzung // Elektrische Bahnen. 96 (1998) Pp. 201–209.
4. Усов В. А., Калинина А. А. О процессе восстановления сцепления колесной пары с рельсами // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 95–98. ISSN 1815–9400.
5. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь : учебник. Москва : Трансжелдориздат, 1961. 615 с.
6. Буйносов А. П., Юдт Е. С. Влияние волнообразного износа рельсов на колесно-моторный блок локомотива // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 10–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-10-12. ISSN 1815–9400.
7. Юдт Е. С., Буйносов А. П. Способ повышения надежности тяговых редукторов электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 2. С. 27–30. ISSN 2079–5920.
8. Буйносов А. П. Модель эксплуатационного износа сложных систем железнодорожного транспорта // Вестник транспорта Поволжья. 2010. № 4 (24). С. 21–25. ISSN 1997–0722.
9. Буйносов А. П. Повышение ресурса бандажей колесных пар электровозов в результате изменения технологии их обточка // Автоматизация и современные технологии. 1992. № 8. С. 23–25. ISSN 0869–4931.

References

1. Minov D. K. Increase of haulage performance of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission [Povyshenie tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachey]. Moscow : Transport, 1965. 267 p.
2. Menshutin N. N. Dependence between adhesion power and sliding speed of a wheelset [Zavisimost' mezhdru siloy stsepleniya i skorost'yu skol'zheniya kolesnoy pary] // VNIIZhT Scientific Journal. 1960. No. 7. Pp. 20–25. ISSN 2223–9731.
3. Engel B., Beck H. P., Alders J. Verschleissreduzierende Rad-schlupfregelung mit hoher Kraftschlussausnutzung // Elektrische Bahnen. 96 (1998) Pp. 201–209.
4. Usov V. A., Kalinina A. A. On the restoration process of wheel-rail coupling [O protsesse vosstanovleniya stsepleniya kolesnoy pary s rel'sami] // Transport of the Urals. 2013. No. 3 (38). Pp. 95–98. ISSN 1815–9400.
5. Shakhunyants G. M. Railway track [Zheleznodorozhnyy put'] : textbook. Moscow : Transzheldorizdat, 1961. 615 p.
6. Buynosov A. P., Yudt E. S. Influence of corrugations of rails on locomotive wheel-motor assembly [Vliyaniye volnoobraznogo iznosa rel'sov na kolesno-motornyy blok lokomotiva] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 10–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-10-12. ISSN 1815–9400.
7. Yudt E. S., Buynosov A. P. Method for increasing the reliability of electric truck traction reducers [Sposob povysheniya nadezhnosti tyagovykh reduktorov elektrovozov] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2020. No. 2. Pp. 27–30. ISSN 2079–5920.
8. Buynosov A. P. Model of operational wear of complicated systems of railway transport [Model' ekspluatatsionnogo iznosa slozhnykh sistem zheleznodorozhnogo transporta] // Bulletin of transport of the Volga region. 2010. No. 4 (24). Pp. 21–25. ISSN 1997–0722.
9. Buynosov A. P. Increase of life of electric locomotives wheelset binding bands by changing technology of their trueing [Povysheniye resursa bandazhey kolesnykh par elektrovozov v rezul'tate izmeneniya tekhnologii ikh obtochkii] // Automation and modern technology. 1992. No. 8. Pp. 23–25. ISSN 0869–4931.

Объем статьи 0,3 авторских листа

УДК 621.316

Валерий Николаевич Ли, доктор технических наук, профессор кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,
Юлия Андреевна Константинова, старший преподаватель кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,
Андрей Михайлович Константинов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ СНИЖЕНИЯ УРАВНИТЕЛЬНОГО ТОКА В ТЯГОВОЙ СЕТИ

Valeriy Nikolaevich Li, DSc in Engineering, Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Yuliya Andreevna Konstantinova, Senior Lecturer, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Andrey Mikhaylovich Konstantinov, PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia

Automatic control system of device for reducing equalizing current in traction network

Аннотация

В статье представлена система автоматического управления устройством снижения уравнительного тока в системе тягового электроснабжения, в том числе функциональная и структурная схемы замкнутой системы с отрицательной обратной связью по напряжению. Рассчитаны коэффициенты и постоянные времени передаточных функций элементов системы. Получены выражения результирующих передаточных функций для разомкнутой и замкнутой систем. Выполнено построение логарифмических характеристик системы, проведен анализ системы на устойчивость, определены запасы устойчивости по амплитуде и фазе, а также показатели качества при автоматическом регулировании напряжения в системе тягового электроснабжения.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, регулирование напряжения, система автоматического управления, устройство снижения уравнительного тока, обратная связь, устойчивость системы.

Summary

The paper presents a study of the proposed system of automatic control of device for reducing equalizing current in traction power supply system. Functional and structural schemes of a closed system with negative voltage feedback were drawn up. The system elements coefficients and time response of transfer functions were calculated. Expressions of resulting transfer functions for open and closed system were obtained. The logarithmic characteristics of the system were constructed, the system was analyzed for stability, and stability reserves in amplitude and phase were determined. The PID controller parameters had been configured. The quality indicators for automatic voltage regulation in traction power supply system were determined.

Keywords: traction power supply system, voltage regulation, automatic control system, equalizing current device, feedback, system stability.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-93-98

Одно из направлений повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения (СТЭ) заключается в снижении уравнительного тока, создающего дополнительные потери в тяговой сети электрических железных дорог переменного тока. Среди причин появления уравнительного тока — разница напряжений тяговых подстанций, для устранения которой предлагается устройство снижения уравнительного тока (УСУТ) с системой автоматического управления (САУ). В отношении устройств, быстродействие которых превышает быстродействие электромеханических регуляторов (РПН) и которые имеют обратную связь по контролируемому параметру в СТЭ, для проверки их работоспособности необходимо выполнить анализ системы автоматического управления.

Цель данного исследования — разработка структуры и анализ системы автоматического управления УСУТ при регулировании напряжения в системе тягового электроснабжения.

Задачи исследования: 1) разработка функциональной и структурной схем САУ УСУТ в составе СТЭ; 2) получение передаточных функций элементов САУ УСУТ и объекта регулирования (тяговой сети); 3) получение обобщенных передаточных функций разомкнутой и замкнутой систем автоматического управления УСУТ в составе СТЭ; 4) выбор оптимального регулятора и расчет его параметров для САУ УСУТ с получением показателей качества регулирования; 5) анализ разомкнутой и замкнутой САУ УСУТ с отрицательной обратной связью по напряжению с построением логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) и логарифмических фазочастотных характеристик (ЛФЧХ) для анализа устойчивости и получения значений запасов по фазе и амплитуде; 6) моделирование динамических характеристик САУ УСУТ.

Функциональная схема САУ УСУТ в составе СТЭ, представляющая собой графическую модель системы, содержащей входной трансформатор, однофазный мостовой выпрямитель, инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), LC-фильтр и вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) [1, 2], а также систему управления, представлена на рис. 1.

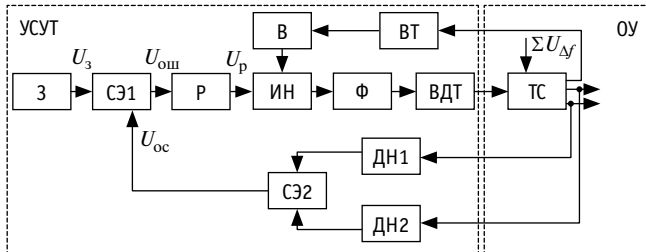


Рис. 1. Функциональная схема устройства снижения уравнительного тока с системой автоматического управления в составе СТЭ:

3 — задающее устройство; СЭ1, СЭ2 — сравнивающие устройства; Р — регулятор; ВТ — входной понижающий трансформатор; В — однофазный мостовой выпрямитель; ИН — инвертор напряжения с ШИМ; Ф — LC-фильтр; ВДТ — вольтодобавочный трансформатор; ТС — тяговая сеть; ДН1, ДН2 — датчики напряжений; ОУ — объект управления; УСУТ — устройство снижения уравнительного тока; U_3 — напряжение задания; U_{oc} — напряжение обратной связи по напряжению; $U_{ош}$ — сигнал ошибки; U_p — управляющий сигнал; $\Sigma U_{\Delta f}$ — суммарное возмущающее воздействие

Измерительная часть САУ УСУТ (см. рис. 1) в результате синхронных измерений вычисляет векторную разницу напряжений ТП1 и ТП2 посредством датчиков напряжений ДН1 и ДН2. Далее сформированный сигнал поступает в управляющую часть САУ УСУТ, где производится сравнение измеренных сигналов с датчиков напряжений ДН1 и ДН2. Затем результирующий сигнал поступает в силовую часть УСУТ, где формируется дополнительное напряжение, которое с противоположным знаком по отношению к фазе напряжения подается в тяговую сеть.

Для анализа УСУТ при регулировании напряжения в СТЭ на основе функциональной схемы (см. рис. 1) разработана структурная схема одноконтурной САУ УСУТ с отрицательной обратной связью по напряжению (рис. 2).

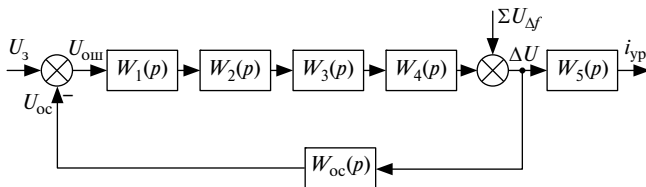


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления устройством снижения уравнительного тока:

$W_1(p)$ — передаточная функция ПИД-регулятора; $W_2(p)$ — передаточная функция входного трансформатора, выпрямителя и инвертора с ШИМ; $W_3(p)$ — передаточная функция LC-фильтра; $W_4(p)$ — передаточная функция вольтодобавочного трансформатора; $W_5(p)$ — передаточная функция тяговой сети; $W_{oc}(p)$ — передаточная функция цепи обратной связи; U_3 — напряжение задания; U_{oc} — напряжение обратной связи по напряжению; $U_{ош}$ — сигнал ошибки; ΔU — сигнал разности напряжений тяговых подстанций; $\Sigma U_{\Delta f}$ — суммарное возмущающее воздействие; i_{yp} — уравнительный ток

САУ УСУТ (см. рис. 2) компенсирует сигнал рассогласования напряжения — сигнал ошибки $U_{ош}$, который определяется разностью сигнала задания U_3 и сигнала отклонения разницы напряжений ΔU , поступающего по цепи отрицательной обратной связи в виде U_{oc} . Далее сигнал ошибки $U_{ош}$ передается в пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор). Уставка сигнала задания для САУ УСУТ равна постоянному значению $U_3 = 0$ для компенсации возникшей разницы напряжений в тяговой сети между напряжениями ТП1 и ТП2 и для снижения уравнительного тока.

В ходе исследования определены передаточные функции звеньев САУ УСУТ с коэффициентами усиления и их постоянными времени.

1. Передаточная функция ПИД-регулятора с идеальным дифференцирующим звеном определяется в соответствии с выражением [3]

$$W(p)_{\text{пид}} = k_{\text{п}} + \frac{k_{\text{и}}}{p} + k_{\text{д}} \cdot p = \frac{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}{T_0 p}, \quad (1)$$

где $k_{\text{и}} = 1/T_0$ — коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора;

$k_{\text{п}} = (T_1 + T_2)/T_0$ — коэффициент усиления пропорциональной составляющей регулятора;

$k_{\text{д}} = T_1 T_2 / T_0$ — коэффициент усиления дифференциальной составляющей регулятора.

2. Передаточная функция преобразователя с ШИМ, включающего входной трансформатор, однофазный мостовой выпрямитель, инвертор напряжения с ШИМ, принимается аперидическим звеном первого порядка [3]:

$$W(p)_{\text{п}} = \frac{k_{\text{п}}}{T_{\text{п}} p + 1}, \quad (2)$$

где $k_{\text{п}} = k_{\text{вт}} \cdot k_{\text{в}} \cdot k_{\text{инв}}$ — коэффициент передачи преобразователя с ШИМ;

$k_{\text{вт}}$ — коэффициент передачи входного трансформатора; $k_{\text{в}}$ — коэффициент передачи однофазного мостового выпрямителя;

$k_{\text{инв}} = U_{\text{вых max}} / U_{\text{y max}}$ — коэффициент передачи инвертора напряжения;

$U_{\text{вых max}}$ — максимальное значение напряжения на выходе инвертора напряжения, В;

$U_{\text{y max}}$ — максимальное значение напряжения управления инвертора напряжения, В;

$T_{\text{п}} = 1/f_{\text{нec}}$ — постоянная времени инвертора напряжения, равная периоду несущего сигнала, с.

3. Передаточная функция выходного LC-фильтра определяется в соответствии с методикой [4] и принимается в виде инерционного звена второго порядка:

$$W(p)_{\text{ф}} = \frac{1}{T_{\text{ф}} p^2 + 1}, \quad (3)$$

где $T_{\text{ф}} = L_{\text{ф}} C_{\text{ф}}$ — постоянная времени LC-фильтра.

4. Передаточная функция вольтодобавочного трансформатора, принятого как идеальное безынерционное звено:

$$W(p)_{\text{ВДТ}} = \frac{U_2}{U_1} = k_{\text{ВДТ}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{ВДТ}}$ — коэффициент передачи вольтодобавочного трансформатора.

5. Передаточная функция тяговой сети получена в соответствии с уравнениями [5]. Схема тяговой сети дополнена вторичной обмоткой ВДТ УСУТ, подключенной в разрыв фидера контактной сети. Тогда передаточная функция тяговой сети как объекта управления (ОУ) запишется в виде апериодического звена

$$W(p)_{\text{ТС}} = \frac{1}{T_{\text{ТС}}p + 1}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ТС}}$ — постоянная времени тяговой сети.

Постоянная времени тяговой сети определяется по формуле

$$T_{\text{ТС}} = \Sigma R_{\text{ТС}} / \Sigma X_{\text{ТС}}, \quad (6)$$

где $\Sigma R_{\text{ТС}}, \Sigma X_{\text{ТС}}$ — суммарные активные и реактивные сопротивления участков, состоящие из сопротивлений контактной сети, силовых трансформаторов, рельсов и вторичной обмотки ВДТ, Ом.

6. Передаточная функция силовых трансформаторов тяговых подстанций ТП1 и ТП2, принятых как идеальные звенья, запишется в виде

$$W(p)_{\text{ТП1}} = W(p)_{\text{ТП2}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{k_{\text{СТ}}}, \quad (7)$$

где $k_{\text{СТ}}$ — коэффициент передачи силового трансформатора тяговой подстанции.

7. Передаточная функция измерительных датчиков напряжения с фильтром в цепи обратной связи принимается апериодическим звеном первого порядка:

$$W(p)_{\text{ДН}} = \frac{k_{\text{ДН}}}{T_{\text{ДН}}p + 1}, \quad (8)$$

где $k_{\text{ДН}}$ — коэффициент передачи датчика напряжения;

$T_{\text{ДН}}$ — постоянная времени фильтра датчика напряжения.

После определения передаточных функций элементов системы по формулам (1)–(8) результирующая передаточная функция разомкнутой системы САУ УСУТ в составе СТЭ будет определяться в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 3.

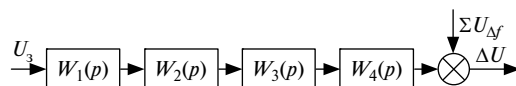


Рис. 3. Структурная схема разомкнутой системы

Результирующая передаточная функция разомкнутой системы (см. рис. 3) запишется в виде произведения передаточ-

ных функций последовательно соединенных звеньев по основному каналу (при отсутствии возмущающих воздействий и цепи обратной связи):

$$W(p)_{\text{РАЗ}} = \frac{\Delta U}{U_3} = \frac{k_{\text{И}} k_{\text{П}} k_{\text{ВДТ}} (T_1 p^2 + T_2 p + 1)}{p(T_3 p + 1)(T_4 p^2 + 1)}, \quad (9)$$

где $k_{\text{И}}$ — коэффициент усиления интегральной составляющей ПИД-регулятора;

$k_{\text{П}}$ — коэффициент передачи преобразователя с ШИМ;

$k_{\text{ВДТ}}$ — коэффициент передачи вольтодобавочного трансформатора УСУТ;

T_1, T_2 — постоянные времени дифференциальной и пропорциональной составляющих ПИД-регулятора;

T_3 — постоянная времени инвертора напряжения в составе преобразователя с ШИМ;

T_4 — постоянная времени выходного LC-фильтра.

Передаточная функция замкнутой системы по управляющему воздействию может быть получена в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 4.

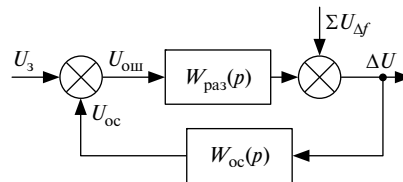


Рис. 4. Структурная схема замкнутой системы

Передаточная функция замкнутой системы по управляющему воздействию запишется в следующем виде:

$$W(p)_{\text{ЗАМК}} = \frac{\Delta U}{U_3} = \frac{k_{\text{И}} k_{\text{П}} k_{\text{ВДТ}} (T_1 p^2 + T_2 p + 1)(T_5 p + 1)}{p(T_3 p + 1)(T_4 p^2 + 1)(T_5 p + 1) + k_{\text{И}} k_{\text{П}} k_{\text{ВДТ}} k_{\text{ОС}} (T_1 p^2 + T_2 p + 1)}, \quad (10)$$

где $k_{\text{ОС}}$ — коэффициент усиления в цепи обратной связи.

Передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию:

$$W(p)_{\text{ЗАМК}f} = \frac{\Delta U}{\Sigma U_{\Delta f}} = \frac{\Sigma W(p)_{f1} - \Sigma W(p)_{f2}}{1 + W(p)_{\text{РАЗ}} \cdot W(p)_{\text{ОС}}}, \quad (11)$$

где $\Sigma W(p)_{f1}$ и $\Sigma W(p)_{f2}$ — сумма передаточных функций возмущающего воздействия напряжений тяговых подстанций ТП1 и ТП2.

Сумма передаточных функций возмущающего воздействия в виде напряжений тяговых подстанций ТП1 и ТП2 будет записана на основании принципа суперпозиции [6]:

$$\Sigma W(p)_{f1} = W(p)_{\text{ТП1}} - W(p)_{\text{КС1}}, \quad (12)$$

$$\Sigma W(p)_{f2} = W(p)_{\text{ТП2}} - W(p)_{\text{КС2}}, \quad (13)$$

где $W(p)_{\text{ТП1}}$ и $W(p)_{\text{ТП2}}$ — передаточная функция силового трансформатора тяговых подстанций ТП1 и ТП2;

$W(p)_{KC1}$ и $W(p)_{KC2}$ — передаточная функция участка контактной сети от тяговых подстанций ТП1 и ТП2 до поста секционирования (ПС).

После подстановки в формулу (11) передаточных функций элементов системы и их преобразования результирующая передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию запишется в виде

$$W(p)_{замк} f = \frac{\Delta U}{\Sigma U_{\Delta f}} = \frac{(k_{ТП1} - k_{KC1} - k_{ТП2} + k_{KC2}) \cdot p(T_3 p + 1)(T_4 p^2 + 1)(T_5 p + 1)}{p(T_3 p + 1)(T_4 p^2 + 1)(T_5 p + 1) + k_{и} k_{п} k_{вдт} k_{ос} (T_1 p^2 + T_2 p + 1)}, \quad (14)$$

где $k_{ТП1}$, $k_{ТП2}$ — соответственно коэффициенты передачи силовых трансформаторов тяговых подстанций ТП1 и ТП2;

k_{KC1} , k_{KC2} — соответственно коэффициенты передачи участков контактной сети от ТП1 до ПС и от ТП2 до ПС.

Возмущающее воздействие САУ УСУТ будет формироваться в соответствии с выражением

$$\Sigma U_{\Delta f} = \left(\frac{U_{1ТП1}}{k_{ТП1}} - (I_{\text{ЭПС}} + I_y) k_{ТП1} \right) - \left(\frac{U_{1ТП2}}{k_{ТП2}} - (I_{\text{ЭПС}} - I_y) k_{ТП2} \right), \quad (15)$$

где $U_{1ТП1}$, $U_{1ТП2}$ — напряжения на стороне высшего напряжения соответственно подстанций ТП1 и ТП2;

$I_{\text{ЭПС}}$ — ток электроподвижного состава (ЭПС);

I_y — уравнильный ток.

В качестве регулятора САУ УСУТ эмпирическим путем была выбрана структура ПИД-регулятора. Параметры ПИД-регулятора рассчитывались по методике [7], в соответствии с которой

$k_{п} = 13,09$, $k_{и} = 4,54$, $k_{д} = 0,093$. Ступенчатая переходная характеристика ПИД-регулятора, настроенного на оптимальное быстродействие, показана на рис. 5.

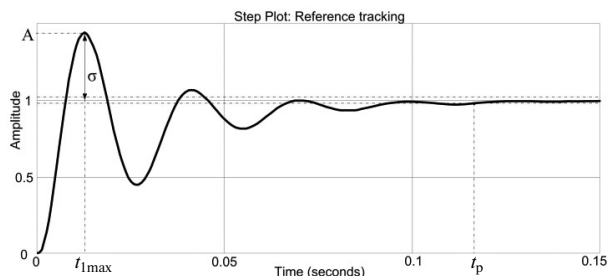


Рис. 5. Переходная характеристика ПИД-регулятора при ступенчатом входном воздействии

Настройка параметров ПИД-регулятора осуществлялась от параметра быстродействия при сохранении устойчивости системы и показателей качества регулирования напряжения. По переходной характеристике (см. рис. 5) определены показатели качества процесса регулирования: перерегулирование $\Sigma = 43\%$ (значение соответствует настройке на симметричный оптимум), амплитуда первого максимума переходной характеристики $A = 1,43$, время достижения первого максимума на переходной характеристике $t_{1\max} = 0,0129$ с, время нарастания переходной характеристики $t_{\text{нар}} = 0,0048$ с, время регулирования $t_p = 0,116$ с, число колебаний переходной характеристики $N = 3$.

Проверка САУ УСУТ в составе СТЭ (см. рис. 2) на устойчивость производилась в программе MATLAB построением ЛАЧХ и ЛФЧХ (диаграмм Бode) разомкнутой и замкнутой систем по формулам (9) и (10). Построенные логарифмические характеристики представлены на рис. 6.

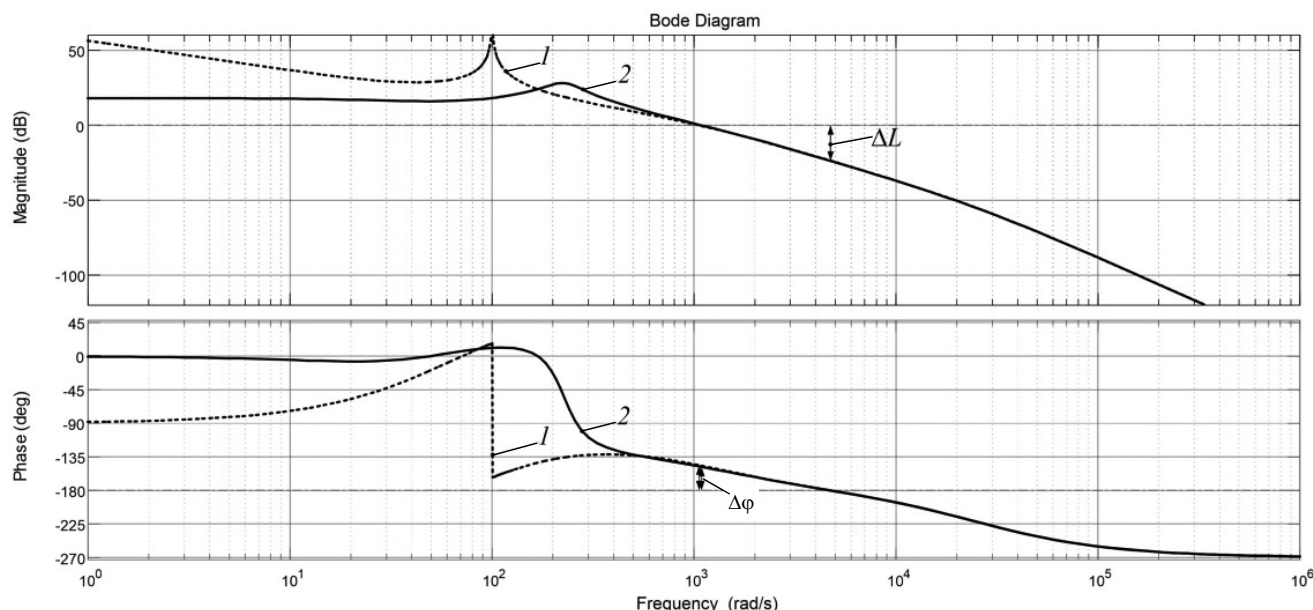


Рис. 6. ЛАЧХ и ЛФЧХ системы с САУ УСУТ:
1 — разомкнутая система; 2 — замкнутая система

Как следует из рис. 6, разомкнутая система устойчива и при замыкании цепи обратной связи она сохраняет устойчивость. Вид ЛАЧХ в области низких частот свидетельствует о том, что САУ УСУТ с обратной связью по напряжению относится к статической системе.

Анализ системы показал, что запас по амплитуде для разомкнутой и замкнутой систем составил $\Delta L = 24,4$ дБ, а запас по фазе для разомкнутой системы $\Delta\varphi_{раз} = 33,9$ град, для замкнутой системы $\Delta\varphi_{замк} = 31,6$ град. Таким образом, система обладает приемлемыми показателями устойчивости при регулировании [8].

Динамические процессы САУ УСУТ в составе СТЭ исследовались в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink. При моделировании учитывалось, что нагрузка сосредоточен-

ная. Имитационная линейаризованная модель системы автоматического управления УСУТ, установленного у тяговой подстанции ТП2, представлена на рис. 7.

Параметры модели (см. рис. 7): напряжение системы внешнего электроснабжения $U_C = 110$ кВ; напряжения на шинах тяговых подстанций $U_{ТП1} = U_{ТП2} = 27,5$ кВ; ток ЭПС в виде единичной нагрузки $I_{ЭПС} = 500$ А; расстояние между тяговыми подстанциями $l_{МПЗ} = 40$ км; тип контактной подвески М-95+МФ-100; тип силовых трансформаторов тяговых подстанций ТДТНЖ-40000/110; тип рельсов Р65.

Результаты исследования на имитационной модели (см. рис. 7) динамических характеристик САУ УСУТ по возмущающему воздействию при разнице напряжений $\Delta U = U_{ТП1} - U_{ТП2} > 0$ представлены на рис. 8.

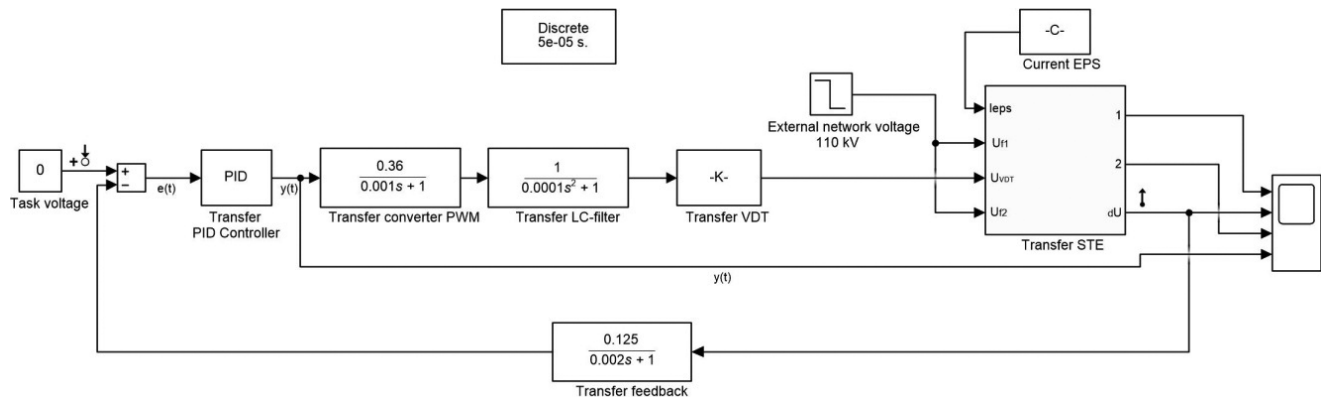


Рис. 7. Имитационная модель САУ УСУТ в MATLAB/Simulink

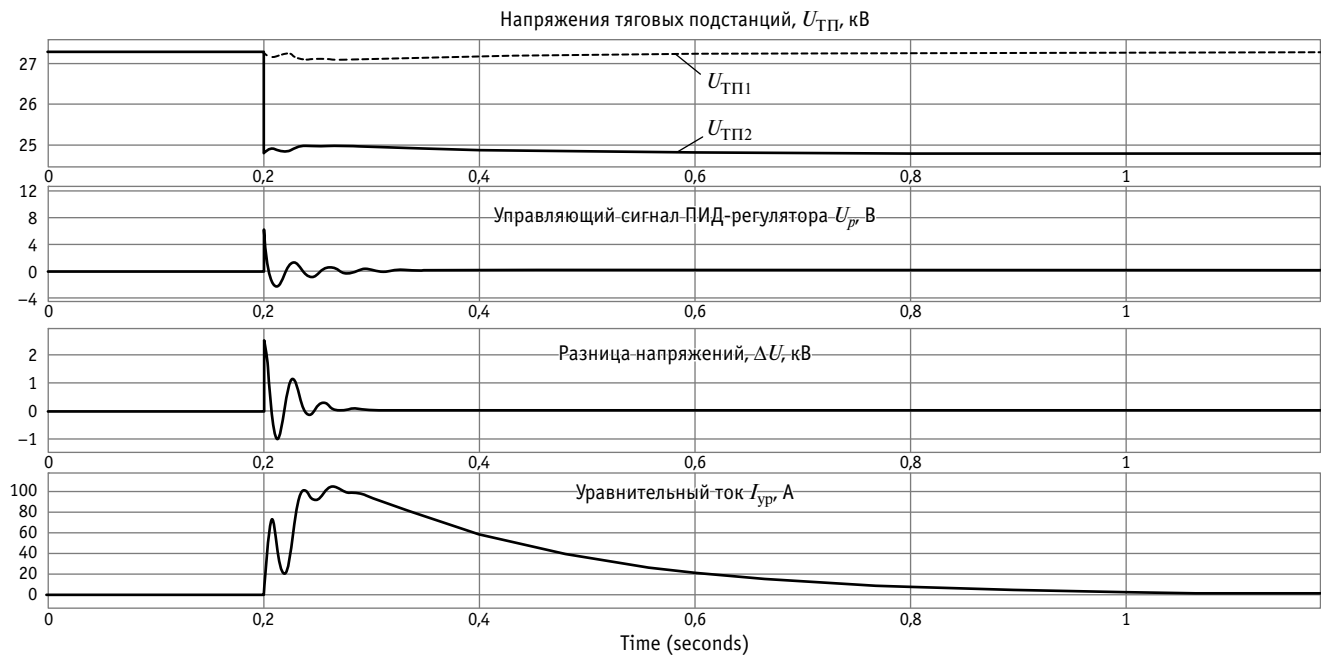


Рис. 8. Динамические характеристики САУ УСУТ при разнице напряжений $\Delta U > 0$

В модели (см. рис. 7) имитировались синхронные векторные измерения напряжений на ТП1 и ТП2 совместно с режимами регулирования дополнительного напряжения $U_{вдт}$, чтобы устранить разницу напряжений ТП1 и ТП2 для устранения уравнительного тока в тяговой сети. Динамические характеристики САУ УСУТ (см. рис. 8) были получены на модели (см. рис. 7) при ступенчатом изменении напряжения на второй подстанции ТП2 со значения напряжения на шинах подстанции 27,5 кВ до напряжения 24,79 кВ в момент времени $t = 0,2$ с. Изменение разницы напряжений в переходном процессе происходило от $\Delta U = 2,49$ кВ до нулевого значения, величина уравнительного тока изменялась с $I_{у\max} = 104$ А до нулевого значения. Таким образом, в момент изменения напряжения на шинах подстанции ТП2 система автоматического регулирования УСУТ отрабатывает ступенчатое возмущающее воздействие и удаляет возникшую ошибку регулирования, снижая разницу напряжений и устраняя уравнительный ток в тяговой сети.

Выводы

1. В соответствии с разработанными функциональной и структурной схемами САУ УСУТ в составе СТЭ получены обобщенные передаточные функции для разомкнутой и замкнутой систем.
2. На основании полученных обобщенных передаточных функций выполнен анализ разомкнутой и замкнутой систем

САУ УСУТ, подтвердивший устойчивость системы СТЭ с УСУТ. Для замкнутой системы запас по амплитуде составил $\Delta L = 24,4$ дБ, а запас по фазе $\Delta\varphi_{\text{замк}} = 31,6$ град — это приемлемые и достаточные показатели устойчивости при автоматическом регулировании. Следует отметить, что для повышения устойчивости системы и увеличения запасов по фазе и амплитуде целесообразно в качестве корректирующего воздействия повышать коэффициент усиления в звене обратной связи.

3. В программе MATLAB/Simulink разработана линеаризованная имитационная модель одноконтурной САУ УСУТ в составе СТЭ с обратной связью по напряжению, включающая модель объекта управления в виде тяговой сети, позволяющей моделировать статические и динамические режимы работы.

4. Выполнены выбор, расчет и настройка параметров оптимального регулятора САУ УСУТ, при котором достигается максимальное быстродействие и обеспечиваются требуемые показатели устойчивости системы.

5. При имитационном моделировании динамических характеристик в программе MATLAB достигнуты требуемые показатели качества системы автоматического регулирования. Полученная переходная характеристика носит сходящийся характер, что также подтверждает устойчивость системы. Для снижения сигнала ошибки регулирования необходимо увеличивать коэффициент интегральной составляющей ПИД-регулятора.

Литература

1. Устройство выравнивания напряжений на шинах 27,5 кВ смежных тяговых подстанций / Ю. А. Константинова, Е. Ю. Тряпкин, В. Н. Ли, А. М. Константинов : патент 2741158 Российская Федерация. № 2020107821; заявл. 20.02.20; опубл. 22.01.21, Бюл. № 3.
2. Автоматическое устройство для снижения уравнительного тока в системе тягового электроснабжения / В. Н. Ли, А. М. Константинов, Ю. А. Константинова, Е. Ю. Тряпкин // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 6. С. 8–11. ISSN 1812–6782.
3. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Санкт-Петербург : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
4. Ерофеев А. А. Теория автоматического управления : учебник. Санкт-Петербург : Политехника, 2002. 302 с.
5. Осипов В. А. Закономерности протекания уравнительных токов в электротяговой сети и методы их минимизации : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, 2000. 23 с.
6. Аржанников Б. А. Системы и элементы теории автоматического регулирования напряжения в тяговом электроснабжении : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 181 с.
7. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech : Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаетов, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров : учебное пособие. Москва : ДМК Пресс, 2017. 423 с.
8. Бархоткин В. А., Кочетков М. П. Системы автоматического управления : учебное пособие. Москва : МИЭТ, 2004. Ч. 1. 172 с.

References

1. Device for equalizing the voltage on the 27.5 kV busbars of adjacent traction substations [Ustroystvo vyravnivaniya napryazheniy na shinakh 27,5 kV smezhnykh tyagovykh podstantsiy] / Yu. A. Konstantinova, E. Yu. Tryapkin, V. N. Li, A. M. Konstantinov : patent 2741158 Russian Federation. No. 2020107821 ; filed 20.02.20 ; publ. 22.01.21, Bulletin No. 3.
2. Automatic device for circulating current decreasing in AC electric traction network [Avtomaticheskoe ustroystvo dlya snizheniya uravnitel'nogo toka v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya] / V. N. Li, A. M. Konstantinov, Yu. A. Konstantinova, E. Yu. Tryapkin // Electronics and electrical equipment of transport. 2019. No. 6. Pp. 8–11. ISSN 1812-6782.
3. German-Galkin S. G. Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on PC [Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK]. St. Petersburg : CROWN-Century, 2008. 368 p.
4. Erofeev A. A. Automatic control theory [Teoriya avtomaticheskogo upravleniya] : textbook. St. Petersburg : Polytechnic, 2002. 302 p.
5. Osipov V. A. Regularities of the flow of equalizing currents in the electric traction network and methods of their minimization [Zakonomernosti protekaniya uravnitel'nykh tokov v elektrodyagovoy seti i metody ikh minimizatsii] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Rostov-on-Don, 2000. 23 p.
6. Arzhannikov B. A. Systems and elements of the theory of automatic voltage regulation in traction power supply [Sistemy i elementy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya napryazheniya v tyagovom elektrosnabzhenii] : textbook. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2014. 181 p.
7. SimInTech technical systems dynamic modeling environment: Workshop on modeling automatic control systems [Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech: Praktikum po modelirovaniyu sistem avtomaticheskogo regulirovaniya] / B. A. Kartashov, E. A. Shabaev, O. S. Kozlov, A. M. Shchekaturov] : textbook. Moscow : DMK Press, 2017. 423 p.
8. Barkhotkin V. A., Kochetkov M. P. Automatic control systems [Sistemy avtomaticheskogo upravleniya] : textbook. Moscow : MIET, 2004. Part 1. 172 p.

Объем статьи 0,5 авторских листа

УДК 621.3.078

Алексей Анатольевич Ковалев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Сергей Викторович Лобастов, инженер научно-исследовательской лаборатории «Системы автоматизированного проектирования контактной сети» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ НАСТРОЙКИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ

Alexey Anatolyevich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Sergey Viktorovich Lobastov, Engineer, Research Laboratory «Systems of Automated Design of Catenary», Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Study of configuration problems of arc-suppression coils

Аннотация

В статье рассмотрены способы настройки дугогасящих реакторов в кабельных, воздушных и смешанных распределительных сетях 6–35 кВ. Особое внимание уделено влиянию внешних факторов (естественной несимметрии сети и помех) на качество настройки, а также поддержанию величины напряжения смещения нейтрали в допустимых пределах. Проанализированы существующие и предложены новые методы устранения воздействия указанных факторов.

Ключевые слова: контур нулевой последовательности сети, дугогасящий реактор, естественная несимметрия сети, регулятор дугогасящего реактора.

Summary

The paper considers methods of configuration of arc-suppression coils in cable, air and mixed distribution networks of 6–35 kV. A special attention the authors have dedicated to influence of external factors (natural unbalance of network and interference) on configuration quality, as well as the maintenance of value of neutral point displacement voltage in acceptable limits. As a result, the authors have analysed the existing methods and suggested new ones for elimination of influence of the specified factors.

Keywords: network zero-sequence circuit, arc-suppression coil, natural unbalance of network, arc-suppression coil regulator.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-99-103

В сетях 6–35 кВ для компенсации емкостного тока применяют дугогасящие реакторы (ДГР). Индуктивность реактора L образует с емкостью сети C контур нулевой последовательности сети (КНПС). Он должен быть настроен в резонанс с точностью не хуже 5% [1] в любой из рабочих конфигураций сети.

В качестве регуляторов ДГР широко используются фазовые регуляторы, сравнивающие сдвиг фаз между напряжением нулевой последовательности $3U_0$ и опорным током [2] (рис. 1). В роли входного (пробного) сигнала, вводимого в КНПС и обеспечивающего качественную работу регулятора и системы компенсации в целом, применяется, как правило, ток искусственной несимметрии промышленной частоты $I_{иск}$. Выходным сигналом КНПС при этом является $3U_0$ либо ток ДГР.

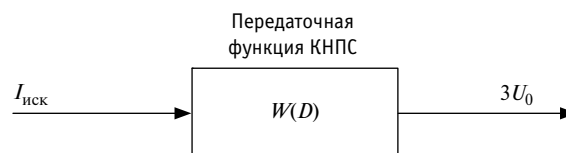


Рис. 1. Контур нулевой последовательности сети (КНПС) как резонансный объект со входом $I_{иск}$ и выходом $3U_0$

Передаточную функцию КНПС как резонансного объекта управления (см. рис. 1) можно представить в виде

$$W(D) = W(i\omega) = \frac{1}{g + j\varepsilon}, \quad (1)$$

где g — активная проводимость изоляции сети, См,

$$g = \omega_{\text{п}} C d,$$

здесь d — коэффициент успокоения (damping factor) КНПС, $\omega_{\text{п}}$ — угловая частота пробного сигнала, с^{-1} ;

$\varepsilon = \omega C - \frac{1}{\omega L}$ — абсолютная расстройка КНПС, равная разнице емкостной проводимости сети ωC и индуктивной проводимости $\frac{1}{\omega L}$ дугогасящего реактора;

ω — угловая частота тока промышленной сети, c^{-1} .

При условии $\varepsilon = \omega C - \frac{1}{\omega L}$ (в этом случае частота свободных колебаний в КНПС без учета потерь равна $\omega_{св} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega$)

достигается точная компенсация емкостного тока сети с помощью индуктивного тока реактора. В данной ситуации при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) в месте повреждения протекают только токи, обусловленные активными потерями в изоляции сети и высшими гармоническими составляющими. Это приводит к снижению энергии, выделяемой в месте ОЗЗ, повышению электро- и пожаробезопасности в сети при ОЗЗ и т.д. [3].

Фазовый регулятор, включенный в КНПС, настраивает реактор в резонанс в нормальном режиме работы сети без ОЗЗ, реагируя на вышеупомянутый сдвиг фаз. Этот сдвиг вычисляют, согласно (1), по формуле

$$\varphi = \arctg(\varepsilon/g), \quad (2)$$

и при точной настройке в резонанс он равен нулю.

Однако в реальной сети всегда присутствуют внешние возмущения, влияющие на точную и качественную работу регуляторов ДГР [4]: небаланс источника энергии, ток нагрузки фидеров, электромагнитные наводки в цепях измерения $3U_0$, ошибки измерения $3U_0$ в разомкнутом треугольнике трансформатора напряжения и т.д., а также естественная несимметрия сети [5].

Влияние этих факторов выражается в появлении тока естественной несимметрии $I_{ест}$ (на рис. 1 не показан), вектор которого изменяется произвольно и регулятором ДГР не контролируется. Ток $I_{ест}$ действуя вместе с током искусственной несимметрии $I_{иск}$ искажает выходной сигнал $3U_0$ и, таким образом, вводит дополнительную погрешность в работу регулятора ДГР. Иными словами, естественная несимметрия приводит к ошибкам идентификации параметров сети [6] в виде

$$\hat{g} = g \cos \Phi - \varepsilon \sin \Phi, \quad \hat{\varepsilon} = \varepsilon \cos \Phi + g \sin \Phi, \quad (3)$$

где Φ — дополнительный фазовый сдвиг, обусловленный током естественной несимметрии.

Перекрестное влияние \hat{g} и $\hat{\varepsilon}$ в (3) тем сильнее, чем выше амплитуда тока $I_{ест}$ и больше его фазовое смещение. Тем не менее, даже при $\Phi = 0$ и при неизменной амплитуде опорного сигнала динамика системы регулирования все равно будет определяться нестабильностью общего коэффициента передачи, вносимой естественной несимметрией.

Кроме того, естественная несимметрия может приводить к сверхнормативным величинам $3U_0$ в точке резонанса в чисто воздушных сетях, где само напряжение несимметрии сети, обусловленное неравномерным расположением проводов относительно земли, может достигать 4–8% U_{Φ} [7].

Рассмотрим применяемые в мировой практике методы устранения влияния естественной несимметрии на точность определения параметров сети.

Для решения поставленной задачи широко используются два направления, которые базируются на следующем.

Угловая частота ω тока искусственной несимметрии

$$\theta(t) = \theta_m \cos(\omega t + \gamma), \quad (4)$$

а также частота тока естественной несимметрии равны частоте тока промышленной сети:

$$2\pi f = 2\pi \cdot 50 \text{ Гц} = 314,16 \text{ с}^{-1}. \quad (4a)$$

При помощи создания пробного сигнала (см. рис. 1) на частоте, отличной от промышленной, можно избавиться от влияния естественной несимметрии на работу регуляторов ДГР.

Рассмотрим методы устранения влияния естественной несимметрии на точность определения параметров сети при использовании фазовых регуляторов ДГР путем формирования пробного сигнала (см. рис. 1) на частоте, отличной от промышленной.

Метод трех частот. Подадим на вход КНПС пробный сигнал (4) на частоте ω , манипулированный другим сигналом с более низкой частотой Ω . В соответствии со сказанным получим

$$\begin{aligned} \theta^*(t) &= \theta_m \cos(\omega t + \gamma)(1 + \cos \Omega t) = \\ &= \frac{\theta_m}{2} [2 \cdot \cos(\omega t + \gamma) + \cos((\omega - \Omega)t + \gamma) + \\ &+ \cos((\omega + \Omega)t + \gamma)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно (5), ток $\theta^*(t)$ содержит составляющие трех частот (ω , $\omega - \Omega$, $\omega + \Omega$), которые, будучи введены в КНПС, приводят к образованию соответствующей реакции сети в виде выходной координаты $3U_0(t)$, синтезированной из составляющих указанных частот.

Физически операция (5) осуществляется прерыванием тока искусственной несимметрии сети (например, тиристором) [8].

Опишем пробный сигнал, проходящий через КНПС на частоте, отличающейся от промышленной.

Перепишем передаточную функцию (1) в виде

$$\frac{1}{W(D)} = \frac{1}{W(i\omega)} = g + j\varepsilon = \frac{\theta^*(t)}{3U_0(t)} = A + jB. \quad (6)$$

Поскольку расстройка $\varepsilon = \omega C - \frac{1}{\omega L}$ равна нулю в точке резонанса на промышленной частоте, то на иной частоте такое равенство соблюдаться не должно. В частности, для боковых частот $\omega_1 = \omega - \Omega$, $\omega_2 = \omega + \Omega$ в случае резонанса получим следующие неравенства:

$$\varepsilon_1 = \omega_1 C - \frac{1}{\omega_1 L} < 0; \quad (7.1)$$

$$\varepsilon_2 = \omega_2 C - \frac{1}{\omega_2 L} > 0. \quad (7.2)$$

Величины $g = A$ и $j\varepsilon = jB$ определяются как действительные и мнимые составляющие частного от деления пробного сигнала $\theta^*(t)$ на $3U_0(t)$, мгновенные значения которых измеряются в регуляторе. Зависимость фазового сдвига $\Delta\varphi$ между $\theta^*(t)$ и $3U_0(t)$ от частоты пробного сигнала более подробно описана в [9, 10], она линейна в области малых величин Ω . Из этого следует, что при малых величинах Ω (порядка единиц Гц) фазовые сдвиги на частотах ω_1, ω_2 отличаются только знаком ($\Delta\varphi_1 = -\Delta\varphi_2$) (Φ_1 и Φ_2 на рис. 2). При увеличении Ω появляются ошибки определения расстройки из-за инерционных свойств КНПС.

Находясь в расстройке, можно определить точку резонанса без перемещения привода реактора (рис. 3) [11]. Для этого используются соотношения (7.1), (7.2) и результаты измерений углов $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ на частотах ω_1, ω_2 .

Описанный метод трех частот применяется в зарубежных регуляторах ДГР (Германия, Австрия). Его недостатками являются:

- сниженное быстродействие из-за применения узкополосных фильтров, настроенных на ω_1, ω_2 ;
- наличие в пробном сигнале составляющей промышленной частоты;

- относительная дороговизна и сложность источника тока по сравнению с обычным конденсаторным или дроссельным источником тока промышленной частоты.

Метод двух частот. Второй указанный выше недостаток можно устранить путем воздействия на ток несимметрии не однополярного, а биполярного манипулирующего сигнала с частотой Ω :

$$\begin{aligned} \theta^{**}(t) &= \theta_m \cos(\omega t + \gamma)(\cos \Omega t) = \\ &= \frac{\theta_m}{2} (\cos((\omega - \Omega)t + \gamma) + \\ &+ \cos((\omega + \Omega)t + \gamma)). \end{aligned} \quad (8)$$

Согласно (8), ток $\theta^{**}(t)$ теперь содержит составляющие только двух частот $\omega - \Omega$ и $\omega + \Omega$, а составляющая промышленной частоты отсутствует. Из этого следует, что амплитуды боковых частот выше тех, что

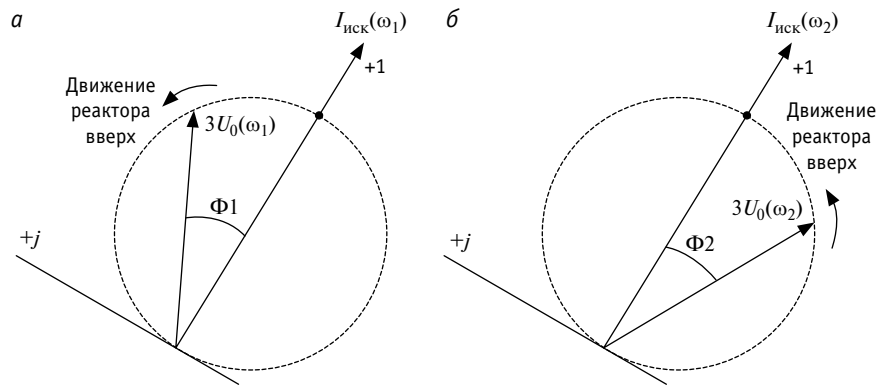


Рис. 2. Положение вход-выходных координат настроенного в резонанс КНПС при подаче в него сигналов с частотами: а — $\omega_1(\Delta\varphi_1 = \Phi_1)$; б — $\omega_2(\Delta\varphi_2 = \Phi_2)$

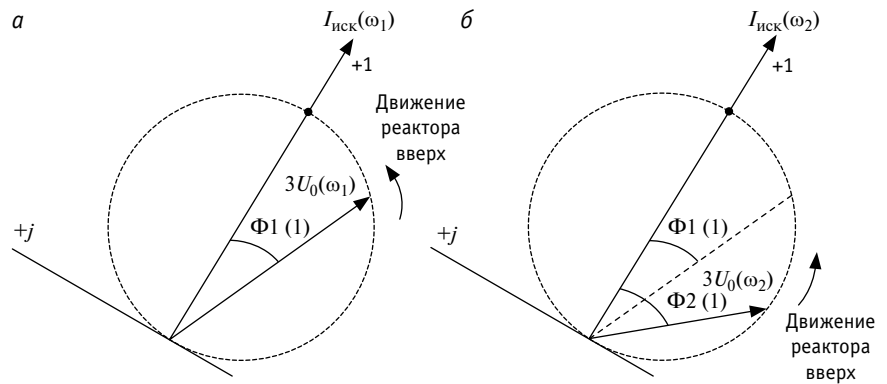


Рис. 3. Положение вход-выходных координат при недокомпенсации КНПС при подаче в него сигналов с частотами: а — $\omega_1(\Delta\varphi_1 = \Phi_1(1))$; б — $\omega_2(\Delta\varphi_2 = \Phi_2(1))$

наблюдались в предыдущем методе при прочих равных условиях, поэтому источник тока становится более экономичным. Физически операция (8) осуществляется специальным тиристорным преобразователем, который инвертирует направление тока в период предыдущей паузы [8].

Метод нескольких частот. Нетрудно заметить, что величины непромышленных частот ω_1, ω_2 зависят от частоты сети ω и частоты модуляции Ω . Если сказать точнее, то эти величины центрированы относительно частоты сети, что нередко бывает неэффективно. Причина заключается в том, что при больших расстройках амплитуда $3U_0$ снижается до значений, при которых определение параметров этого вектора и, следовательно, параметров сети (6) затруднено [5, 9, 12].

Для устранения указанного недостатка на практике используют источники тока несимметрии с изменяемой частотой, построенные на базе современной силовой

техники. В зависимости от характера изменения частоты тока выделяют следующие типы источников тока [13]: источник тока с дискретно изменяемой частотой, источник тока с непрерывно изменяемой частотой [9], источник тока, синтезирующий одновременно составляющие токов различных частот [12].

Рассмотрим возможность устранения влияния естественной несимметрии на точность определения параметров сети при помощи метода, использующего свободные колебания в КНПС.

В основе этого метода лежит анализ реакции КНПС в виде $3U_0$ и тока реактора на входной сигнал в виде δ -функции Дирака. Такой реакцией является затухающее гармоническое колебание с частотой свободных колебаний $\omega_{св}$ и коэффициентом затухания α . Численные значения $\omega_{св}$ и α используются для определения соответственно расстройки и активной проводимости изоляции сети.

В качестве функции Дирака используются искусственно созданные импульсные воздействия на сеть. Такие воздействия могут быть реализованы с помощью:

пассивных методов (например, кратковременного заземления вторичной обмотки однофазного трансформатора, включенного в одну из фаз сети [14]);

активных методов (например, разряда предварительно заряженного конденсатора через нейтральную точку исследуемой сети [14, 15] или подачи импульса тока в обмотку управления реактора).

Влияние естественной несимметрии на точность определения параметров сети в этом методе снижается различными способами. В частности, применяется подача импульсов чередующейся полярности, при этом выделение свободной состав-

ляющей осуществляется в специальном сумматоре-накопителе, в который поступают текущий и задержанный на время T сигналы [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенного следует, что для снижения влияния естественной несимметрии сетей 6–35 кВ и помех на работу регуляторов ДГР, а следовательно, на надежность работы таких сетей применяются методы настройки КНПС, основанные на использовании вынужденных колебаний непромышленных частот [4, 8, 9, 11–13, 17], а также на использовании свободных колебаний в КНПС [15–17]. При этом в первом варианте возможность манипуляции входного сигнала КНПС дает преимущество, которое заключается в отсут-

ствии необходимости перемещать привод реактора для определения расстройки и точки резонанса.

Однако реализация таких методов не решает проблемы сверхнормативного смещения нейтрали в смешанных и воздушных сетях, где в точке резонанса величина $3U_0$ может достигать 40 В и более. В этом случае для снижения $3U_0$ может быть применен ряд не рассмотренных в данной статье методов, среди которых:

искусственное снижение добротности и поддержание определенной расстройки в контуре нулевой последовательности сети до момента однофазного замыкания на землю;

применение специальных поисковых параметрических регуляторов ДГР [17].

Литература

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Москва : Энергия, 1977. 288 с.
2. Мокин Б. И., Выговский Ю. Н. Автоматические регуляторы в электрических сетях. Киев : Техника, 1985. 104 с.
3. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов. Москва : Энергия, 1971. 152 с.
4. Operational experiences with the new method to control Petersen coils by injection of two frequencies / G. Druml, S. Steger, O. Seifert, A. Kugi // 19th International conference on electricity distribution CIRED 2007. Vienna, 2007.
5. Druml G., Kugi A., Parr B. Control of Petersen coils // XI International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. Linz, 2001.
6. Обабков В. К. Синтез адаптивных систем управления резонансными объектами. Киев : Наукова думка, 1993. 254 с.
7. РД 34.20.179 (ТИ 34.70-070-87). Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ / Министерство энергетики и электрификации СССР, 1988.
8. Druml G., Seifert O. New method for the state evaluation of the zero-sequence system // 15th PSCC. Liege, 2005.
9. Zeng X., Xu Y., Wang Y. Some novel techniques for insulation parameters measurement and Petersen coil control in distribution systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. No. 4.
10. Контроль настройки дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–35 кВ на основе метода наложения вспомогательных токов двух частот / Р. А. Вайнштейн, В. В. Шестакова, С. Н. Пашковский [и др.] // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 4. С. 149–156. ISSN 2413–1830.
11. Druml G., Kugi A. Determining parameters of Petersen-coil compensated network without de-tuning the coils, by feeding com-

References

1. Engineering instructions of electric stations and networks [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stantsiy i setey]. Moscow : Energy, 1977. 288 p.
2. Mokin B. I., Vygovskiy Yu. N. Automatic regulators in electric networks [Avtomaticheskie regulatory v elektricheskikh setyakh]. Kiev : Technique, 1985. 104 p.
3. Likhachev F. A. Ground short circuits in networks with insulated neutral and compensation of capacitive currents [Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i kompensatsiyey emkostnykh tokov]. Moscow : Energy, 1971. 152 p.
4. Operational experiences with the new method to control Petersen coils by injection of two frequencies / G. Druml, S. Steger, O. Seifert, A. Kugi // 19th International conference on electricity distribution CIRED 2007. Vienna, 2007.
5. Druml G., Kugi A., Parr B. Control of Petersen coils // XI International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. Linz, 2001.
6. Obabkov V. K. Synthesis of adaptive systems for control of resonance objects [Sintez adaptivnykh sistem upravleniya rezonansnymi ob'ektami]. Kiev : Scientific Thought, 1993. 254 p.
7. RD 34.20.179 (Standard Instruction 34.70-070-87). Standard instruction on compensation of capacitive current of ground short circuit in electric networks of 6–35 kV [Tipovaya instruktsiya po kompensatsii emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–35 kV] / Ministry of Energy and Electrification of the USSR, 1988.
8. Druml G., Seifert O. New method for the state evaluation of the zero-sequence system // 15th PSCC. Liege, 2005.
9. Zeng X., Xu Y., Wang Y. Some novel techniques for insulation parameters measurement and Petersen coil control in distribution systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. No. 4.
10. Control of configuration of arc-suppression coils for 6–35 kV networks on the basis of method consisting in superpositioning of auxiliary currents of two frequencies [Kontrol' nastroyki dugogasyashhikh reaktorov v elektricheskikh setyakh 6–35 kV na osnove metoda nalozheniya vspomogatelnykh tokov dvukh chastot] / R. A. Vaynshteyn, V. V. Shestakova, S. N. Pashkovskiy [et al.] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2014. Vol. 325. No. 4. Pp. 149–156. ISSN 2413–1830.
11. Druml G., Kugi A. Determining parameters of Petersen-coil compensated network without de-tuning the coils, by feeding composite current into

- posite current into zero-phase system, and measuring voltages. 2003. DE10307668B3, IPC H02H9/08.
12. Vancata P., Matuljak I. New method of arc suppression coil tuning using truly multifrequency current signal // 25th International Conference of Electricity Distribution. Madrid, 2019.
 13. The modern solutions applicable in determination of earth fault parameters in the MV network / J. Lorenc, A. Kwapisz, B. Staszak, J. Handke // Modern Electric Power Systems. Wroclaw, 2010.
 14. Ortolani F., Leikermoser A. Neutral compensation and network monitoring — test field experience in determining resonant point and homopolar parameters with active and passive pulse injection // 20th International Conference on Electricity Distribution. Prague, 2009.
 15. Device for MV network inspection via pulse injection / F. Ortolani, R. Calone, P. Paulon, A. Leikermoser // 21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt, 2011.
 16. Способ выделения свободной составляющей в контуре нулевой последовательности электрической сети и устройство автоматической настройки дугогасящего реактора на его основе / Н. В. Данилов, М. И. Петров : патент 2621670 Российская Федерация. № 2015151770; заявл. 02.12.15; опубл. 07.06.17, Бюл. № 16.
 17. Поисковый регулятор для резонансной настройки контура нулевой последовательности сети / В. К. Обабков, Ю. Н. Целуевский, Е. В. Сергин [и др.] : авторское свидетельство 1080231 СССР. № 3446350; заявл. 02.06.82; опубл. 15.03.84, Бюл. № 10.
- zero-phase system, and measuring voltages. 2003. DE10307668B3, IPC H02H9/08.
12. Vancata P., Matuljak I. New method of arc suppression coil tuning using truly multifrequency current signal // 25th International Conference of Electricity Distribution. Madrid, 2019.
 13. The modern solutions applicable in determination of earth fault parameters in the MV network / J. Lorenc, A. Kwapisz, B. Staszak, J. Handke // Modern Electric Power Systems. Wroclaw, 2010.
 14. Ortolani F., Leikermoser A. Neutral compensation and network monitoring – test field experience in determining resonant point and homopolar parameters with active and passive pulse injection // 20th International Conference on Electricity Distribution. Prague, 2009.
 15. Device for MV network inspection via pulse injection / F. Ortolani, R. Calone, P. Paulon, A. Leikermoser // 21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt, 2011.
 16. A method of separation of free component in zero-sequence circuit of electric network and a device for automatic configuration of arc-suppression coil on its basis [Sposob vydeleniya svobodnoy sostavlyayushhey v konture nulevoy posledovatel'nosti elektricheskoy seti i ustroystvo avtomaticheskoy nastroyki dugogasyashhego reaktora na ego osnove] / N. V. Danilov, M. I. Petrov : patent 2621670 Russian Federation. No. 2015151770 ; filed 02.12.15 ; publ. 07.06.17, Bulletin No. 16.
 17. Searching regulators for resonance configuration of network zero-sequence circuit [Poiskovyy regulyator dlya rezonansnoy nastroyki kontura nulevoy posledovatel'nosti seti] / V. K. Obabkov, Yu. N. Tseluevskiy, E. V. Sergin [et al.] : author certificate 1080231 USSR. No. 3446350; filed 02.06.82 ; publ. 15.03.84, Bulletin No. 10.

Объем статьи 0,4 авторских листа

УДК 621.331:621.311.4:621.314.5

Юрий Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Иван Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Yuriy Pavlovich Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Ivan Pavlovich Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Energy efficiency analysis of operation of rectifying and inverter transformers for direct current traction substations

Аннотация

В статье рассмотрены схемы, основные технические характеристики, параметры и режимы работы выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), применяемых на тяговых подстанциях постоянного тока Свердловской железной дороги. Выполнен анализ объемов возврата электрической энергии рекуперации по отношению к расходу электрической энергии на тягу поездов.

По результатам моделирования работы системы тягового электроснабжения определен потенциал рекуперации на участках Свердловской железной дороги. Предложены основные мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности и надежности работы ВИП.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, тяга поездов, энергия рекуперации, расход электроэнергии, тяговые подстанции, выпрямительно-инверторные преобразователи.

Summary

The paper considers schemes, main technical characteristics, parameters and operation modes of rectifying and inverter transformers that are used on direct current traction substations of the Sverdlovsk Railway. The authors have carried out an analysis of volumes of returned recuperation energy in relation to power consumption on traction of trains. As a result, the authors have determined a potential of recuperation on sections of the Sverdlovsk Railway. They have suggested main measures aimed at increase of energy efficiency and reliability of rectifying and inverter transformers operation.

Keywords: energy efficiency, traction of trains, recuperation energy, energy consumption, traction substations, rectifying and inverter transformers.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-104-108

Электрические железные дороги представляют собой вид транспорта, для которого характерно высокое потребление электрической энергии, при этом на тягу поездов используется около 85 % от всей потребленной электрической энергии в ОАО «РЖД». На 2010 г. потребление электрической энергии на тягу поездов составило около 44,7 млрд кВт·ч, а значения на 2020 и 2030 гг. составляют соответственно 52,1 и 58,3 млрд кВт·ч [1].

В связи с этим, а также в связи с ростом стоимости электроэнергии задача повышения энергетической эффективности железнодорожного транспорта за счет снижения расхода электрической энергии на тягу поездов, уменьшения потерь и повышения качества потребляемой электрическими железными дорогами электроэнергии является актуальной. В соответствии с Энергетической стратегией холдинга «РЖД» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. к числу основных энергосберегающих технических решений и технологий, на которые должна быть ориентирована тяговая энергетика ОАО «РЖД», относится повышение эффективности рекуперативного торможения электроподвижным составом (ЭПС), позволяющее не только сэкономить значительную часть электрической энергии рекуперации (более 10–15 % от электроэнергии, расходуемой на тягу поездов), но и повысить безопасность и скорость движения поездов [1, 2].

Для обеспечения рекуперативного торможения ЭПС энергия рекуперации должна быть потреблена соседними поездами, работающими в тяговом режиме. При отсутствии приемника энергии рекуперации происходит срыв электрического торможения ЭПС. Чтобы исключить такой режим работы ЭПС, на тяговых подстанциях постоянного тока применяют выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), которые обеспечивают прием избыточной энергии рекуперации и возврат ее в энергосистему. Объем энергии рекуперации и доля избыточной энергии зависят от профиля пути, веса поездов, интенсивности и графика движения,

а также от наличия и надежности работы ВИП на тяговых подстанциях постоянного тока и блоков рекуперации на ЭПС [2].

Несмотря на все мероприятия, проводимые техническими службами ОАО «РЖД», эффективность применения рекуперативного торможения на ряде железных дорог стала снижаться. Например, в 2010 г. объем рекуперации по сравнению с 1988 г. уменьшился почти в три раза. Это было вызвано прежде всего увеличением доли ЭПС, не оборудованного системами рекуперации, а также большим сроком эксплуатации ВИП на тяговых подстанциях [1, 3].

На 2021 г. по Свердловской железной дороге на горных однопутных участках для приема избыточной энергии рекуперации на 15 тяговых подстанциях постоянного тока применены ВИП в количестве 20 шт., при этом на пяти тяговых подстанциях установлено по два ВИП (один находится в работе, а второй — в резерве). В состав ВИП входят преобразовательный трансформатор, выпрямитель и инвертор, а также коммутационная и защитная аппаратура.

На тяговых подстанциях Свердловской железной дороги в разные периоды введены в эксплуатацию следующие типы инверторов.

ВИПЭ-2У3 — 8 шт., введены в эксплуатацию в 1979–1989 гг. Схемы преобразования: типовая 6-пульсовая нулевая схема две обратные звезды, включающая уравнительный реактор с преобразовательным трансформатором ТДРУ-20000/10ИУ1 (1967 г.), — 5 шт.; 6-пульсовая нулевая схема две обратные звезды с уравнительным реактором с преобразовательным трансформатором ТДПУ-20000/35ЖУ1 (1967 г.) и управляемыми реакторами — 2 шт.; 6-пульсовая мостовая схема с преобразовательным трансформатором ТДП-16000/10ЖУ1 (1976 г.) и управляемыми реакторами — 1 шт.

И-ПТП-2,4к-4к-3/6(12) У3 — 3 шт., введены в эксплуатацию в 1991–1994 гг. Схемы преобразования: типовая 6-пульсовая мостовая схема с преобразовательным трансформатором ТДП-12500/10ИУ1 — 1 шт.; типовая 12-пульсовая схема последовательного типа (с последовательным соединением трехфазных мостов) с преобразовательным трансформатором ТРДТП-20000/35ИУ1 — 2 шт.

И-ПТП-1,6к-3,8к-50-УХЛ4 — 9 шт., введены в эксплуатацию в 2012–2013 гг. Схемы преобразования: типовая 6-пульсовая мостовая схема с преобразовательным трансформатором ТДП-12500/10ИУ1 — 4 шт.; 6-пульсовая мостовая схема с компенсирующим устройством (КУ) и преобразовательным трансформатором ТДП-12500/10ИУ1 (имеющим специальное исполнение) — 5 шт.

ВИП с компенсирующим устройством характеризуются достаточно надежной работой и имеют по сравнению с типовыми 6-пульсовыми мостовыми ВИП повышенные энергетические показатели (коэффициент мощности, коэффициент полезного действия) и улучшенные внешние характеристики в выпрямительном и инверторном режимах работы [4].

Преобразователи типа ВИПЭ-2У3 на штыревых диодах и тиристорах были разработаны ВНИИЖТом и Таллинским электротехническим заводом в 1973 г. по 6-пульсовой мостовой схеме преобразования, а начиная с 1978 г. — по 6-пульсовой нулевой схеме с уравнительным реактором.

Инвертор типа И-ПТП-2,4к-4к-3/6(12) У3 на таблеточных тиристорах был разработан ВНИИЖТом, УрГУПСом и НПО «Электротехника» (г. Таллин) в 1990 г. по 6-пульсовой мостовой схеме преобразования и 12-пульсовой мостовой схеме последовательного типа.

С 2011 г. ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» серийно выпускает инвертор типа И-ПТП-1,6к-3,8к-50-УХЛ4 на таблеточных тиристорах повышенного класса для замены инверторов по 6-пульсовой мостовой схеме преобразования и 12-пульсовой мостовой схеме последовательного типа.

В настоящее время серийный выпуск инверторных преобразователей для замены ВИПЭ-2У3 по 6-пульсовой нулевой схеме с уравнительным реактором в нашей стране не производится. Это связано с тем, что ВИП по 6-пульсовым схемам преобразования имеют более низкие энергетические показатели и характеристики по сравнению с 12-пульсовыми [5–7].

Кроме того, ВИП по 6-пульсовым нулевым схемам имеет более тяжелые аварийные режимы (опрокидывания инвертора), вызванные совместным режимом работы выпрямителя и инвертора, что снижает надежность работы ВИП. Поэтому ВИП в большинстве случаев работают только в инверторном режиме — параллельно с другим выпрямительным агрегатом, что, в свою очередь, снижает эффективность ВИП.

Именно поэтому, а также в связи с большим сроком службы (более 50 лет) для ВИП по 6-пульсовым нулевым схемам преобразовательные трансформаторы ТДРУ-20000/10ИУ1 и ТДПУ-20000/35ЖУ1 рекомендуются к замене на трансформатор ТРДТП-20000/10(35) ИУ1, применение которого позволяет реализовать 12-пульсовый ВИП [8].

Например, замена трансформатора ТДРУ-20000/10ИУ1 ($P_{xx} = 29,0$ кВт) на трансформатор ТРДТП-20000/10ИУ1 ($P_{xx} = 13,0$ кВт) приведет к снижению потерь холостого хода на 140,2 тыс. кВт·ч в год, что в денежном выражении (при существующих ценах на электроэнергию на тягу поездов) позволит снизить годовые эксплуатационные расходы на 294,3 тыс. руб.

Для случая применения нетиповой схемы ВИП по 6-пульсовой нулевой схеме замена трансформатора ТДПУ-20000/35ЖУ1 ($P_{xx} = 29,0$ кВт) с дросселем насыщения ДТД-6300/35 ($P_{xx} = 16,0$ кВт) и шкафом управления ШАУН-2 ($P_H = 12,0$ кВт) на трансформатор ТРДТП-20000/35ИУ1 ($P_{xx} = 13,0$ кВт) приведет к снижению потерь холостого хода на 385,4 тыс. кВт·ч в год, что в денежном выражении (при существующих ценах на электроэнергию на тягу поездов) позволит уменьшить годовые эксплуатационные расходы уже на 809,4 тыс. руб.

12-пульсовые ВИП характеризуются достаточно высокой надежностью и отличаются по сравнению с типовыми 6-пульсовыми следующими преимуществами [5–7, 9–15]:

- повышенным коэффициентом мощности в выпрямительном и инверторном режимах работы;
- повышенным коэффициентом полезного действия (КПД);
- улучшенным спектральным составом и качеством сетевого тока;
- улучшенным спектральным составом и качеством выпрямленного напряжения, что позволяет применять на тяговых подстанциях более простые и экономичные однозвенные резонансно-аперiodические сглаживающие фильтры;

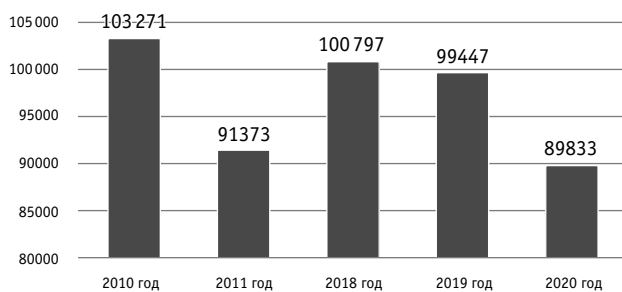


Рис. 1. Расход электрической энергии ВИП на тягу поездов, тыс. кВт·ч в год

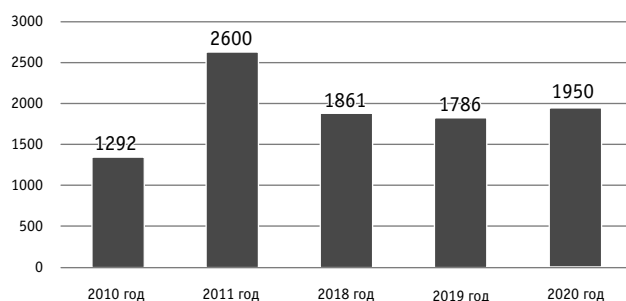


Рис. 2. Возврат электрической энергии рекуперации ВИП, тыс. кВт·ч в год

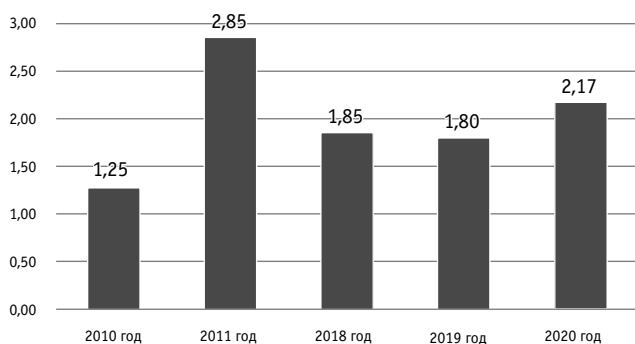


Рис. 3. Доля возврата электрической энергии рекуперации ВИП по отношению к расходу на тягу поездов, %

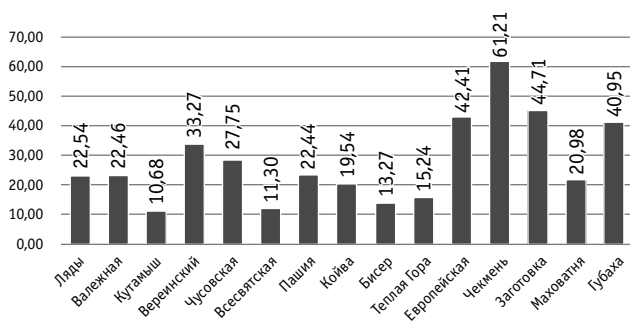


Рис. 4. Доля возврата электрической энергии рекуперации ВИП для тяговых подстанций Свердловской железной дороги по результатам моделирования в ПК «КОРТЕС», %

уменьшенным наклоном внешней характеристики выпрямителя, благодаря чему увеличивается напряжение на шинах тяговой подстанции;

более легкими аварийными режимами при совместной работе выпрямителя и инвертора, что повышает надежность работы ВИП.

Результаты учета электрической энергии на тягу и электрической энергии рекуперации выпрямительно-инверторных агрегатов тяговых подстанций в границах Свердловской железной дороги за 2010, 2011, 2018, 2019 и 2020 гг. представлены на рис. 1 и 2.

Как видно из рис. 1, годовое потребление электрической энергии на тягу поездов снизилось с 103 271 тыс. кВт·ч в 2010 г. до 89 833 тыс. кВт·ч в 2020-м. В свою очередь, из рис. 2 видно, что годовая переработка электрической энергии рекуперации выпрямительно-инверторными агрегатами тяговых подстанций увеличилась с 1 292 тыс. кВт·ч в 2010 г. до 1 950 тыс. кВт·ч в 2020-м. При этом доля возврата электрической энергии рекуперации по отношению к расходу электрической энергии на тягу выросла за последние 10 лет с 1,25% в 2010 г. до 2,17% в 2020-м (рис. 3). Все эти данные говорят о недостаточности мероприятий, выполняемых техническими службами по повышению энергетической эффективности рекуперативного торможения ЭПС на Свердловской железной дороге.

Проведенное в 2011 и 2012 гг. энергетическое обследование системы тягового электроснабжения (СТЭ) и ЭПС Свердловской железной дороги показало, что большой потенциал повышения энергетической эффективности электротяги поездов могут дать мероприятия, направленные на увеличение использования рекуперативного торможения ЭПС [16].

Для расчета энергии рекуперации применялось имитационное моделирование с использованием программного комплекса «КОРТЕС» (разработчик — ОАО «ВНИИЖТ»), утвержденного техническим указанием Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» № К-108/04 от 24.02.2004 г.

При оценке энергетической эффективности рекуперативного торможения моделировался исполненный суточный интервал графика движения поездов на следующих участках Свердловской железной дороги: Чусовская — Половинка, Левшино — Чусовская и Чусовская — Азиатская. Продольный профиль пути данных участков содержит протяженные спуски на перегонах с уклонами:

на участке Чусовская — Половинка до 16,6‰ в нечетном и 13,8‰ в четном направлениях;

на участке Левшино — Чусовская до 11,7‰ в нечетном и 12,2‰ в четном направлениях;

на участке Чусовская — Азиатская до 17,0‰ в нечетном направлении и 9,9‰ в четном направлении.

Результаты моделирования СТЭ и оценки потенциала рекуперативного торможения ЭПС на рассматриваемых участках Свердловской железной дороги представлены на рис. 4.

Результаты расчетов в ПК «КОРТЕС» показывают, что доля возврата электрической энергии рекуперации в энергосистему по отношению к расходу электрической энергии на тягу поездов (W_p/W_t) (см. рис. 4) для каждой тяговой подстанции с ВИП

может достигать от 10,66 до 61,21 %, для тяговых подстанций с ВИП на трех вышерассмотренных участках — соответственно в среднем 28,05, 18,00 и 22,05 %, для тяговых подстанций с ВИП по всей Свердловской железной дороге — в среднем 21,64 %. С учетом фактической доли электрической энергии рекуперации, возвращенной в энергосистему от потребления на тягу поездов за 2020 г., равной 2,17 % (см. рис. 3), потенциал рекуперации на участках Свердловской железной дороги составит $\Delta P = 21,64 - 2,17 = 19,47$ %.

ВЫВОДЫ

1. Сделан анализ схем и режимов работы ВИП, применяемых в настоящее время на тяговых подстанциях Свердловской железной дороги. Установлено, что 8 из 15 ВИП выполнены по 6- и 12-пульсовым мостовым схемам преобразования, а 7 ВИП — по 6-пульсовой нулевой схеме с уравнительным реактором, которая характеризуется неоптимальными внешними характеристиками, низкими энергетическими показателями в выпрямительном и инверторном режимах работы и ненадежной работой при аварийных режимах. При этом срок эксплуатации трансформаторов для таких ВИП, выполненных по 6-пульсовой нулевой схеме с уравнительным реактором, составляет более 50 лет.

2. Проанализированы объемы возврата электрической энергии рекуперации и расхода на тягу поездов на тяговых подстанциях с ВИП в границах Свердловской железной дороги за 2010–2020 гг. Выявлено, что доля возврата электрической энергии рекуперации по отношению к расходу электрической энергии на тягу поездов увеличилась незначительно — с 1,25 % в 2010 г. до 2,17 % в 2020-м.

3. По результатам моделирования работы СТЭ и ЭПС с использованием ПК «КОРТЭС» определен потенциал рекуперации на участках Свердловской железной дороги, объем которого составил 19,47 %.

4. Предложены основные мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности передачи электрической энергии рекуперации:

замена на тяговых подстанциях ВИП по 6-пульсовой нулевой схеме с уравнительным реактором на ВИП по 12-пульсовой схеме последовательного типа с заменой преобразовательного трансформатора;

регулировка напряжения на шинах 3,3 кВ тяговых подстанций;

регулировка внешних характеристик ВИП в инверторном режиме работы;

повышение надежности блоков рекуперации на ЭПС.

Литература

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2537р. Москва, 2016. 76 с.
2. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций / С. Д. Соколов, Ю. М. Бей, Я. Д. Гуральник, О. Г. Чаусов. Москва : Транспорт, 1979. 264 с.
3. Никифоров М. М., Каштанов А. Л., Кандаев В. А. Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения // Известия Транссиба. 2012. № 1 (9). С. 72–78. ISSN 2220–4245.
4. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. Москва : Транспорт, 1983. 183 с.
5. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко [и др.] ; под ред. М. Г. Шалимова. Москва : Транспорт, 1990. 127 с.
6. Неугодников Ю. П. Внешние и ограничительные характеристики 12- и 24-пульсовых инверторных преобразователей тяговых подстанций // Транспорт Урала. 2006. № 1 (8). С. 28–37. ISSN 1815–9400.
7. Неугодников Ю. П., Неугодников А. Ю. Внешние характеристики и энергетические показатели 12- и 24-пульсовых преобразователей повышенного напряжения 6,6 и 13,2 кВ // Транспорт Урала. 2007. № 4 (15). С. 80–85. ISSN 1815–9400.
8. Двенадцатипульсовый выпрямительно-инверторный преобразователь для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / В. П. Неугодников, Ю. П. Неугодников, Д. Ю. Бей, И. П. Неугодников // Актуальные проблемы безопасности на

References

1. The energy strategy of the holding Russian Railways for the period until 2020 and for the future until 2030 [Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda] : approved by the Order of JSC Russian Railways dated 14.12.2016 No. 2537r. Moscow, 2016. 76 p.
2. Semiconductor converting devices of traction substations [Poluprovodnikovye preobrazovatel'nye agregaty tyagovykh podstantsiy] / S. D. Sokolov, Yu. M. Bey, Ya. D. Gural'nik, O. G. Chausov. Moscow : Transport, 1979. 264 p.
3. Nikiforov M. M., Kashtanov A. L., Kandaev V. A. Method of assessment of potential energy regenerative braking [Metodika otsenki potentsiala energoeffektivnosti primeneniya rekuperativnogo tormozheniya] // Journal of Transsib Railway Studies. 2012. No. 1 (9). Pp. 72–78. ISSN 2220–4245.
4. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. Capacitor units for electrified railways [Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog]. Moscow : Transport, 1983. 183 p.
5. Twelve-pulse semiconductor rectifiers of traction substations [Dvenadtsatipul'sovye poluprovodnikovye vypryamiteli tyagovykh podstantsiy] / B. S. Barkovskiy, G. S. Magay, V. P. Matsenko [et al.] ; ed. by M. G. Shalimov. Moscow : Transport, 1990. 127 p.
6. Neugodnikov Yu. P. External and limiting characteristics of 12-pulse and 24-pulse inverter transformers of traction substations [Vneshnie i ogranichitel'nye kharakteristiki 12- i 24-pul'sovykh invertornykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Transport of the Urals. 2006. No. 1 (8). Pp. 28–37. ISSN 1815–9400.
7. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov A. Yu. External characteristics and energy indicators of 12-pulse and 24-pulse increased-voltage transformers of 6.6 and 13.2 kV [Vneshnie kharakteristiki i energeticheskie pokazateli 12- i 24-pul'sovykh preobrazovateley povyshennogo napryazheniya 6,6 i 13,2 kV] // Transport of the Urals. 2007. No. 4 (15). Pp. 80–85. ISSN 1815–9400.
8. Twelve-pulse rectifying and inverter transformer for traction substations of electrified railways [Dvenadtsatipul'sovyy vypryamitel'no-invertorny preobrazovatel' dlya tyagovykh podstantsiy elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog] / V. P. Neugodnikov, Yu. P. Neugodnikov, D. Yu. Bey,

железнодорожном транспорте : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГАПС, 1994. Вып. 1 (83). С. 142–150.

9. Неугодников Ю. П., Неугодников В. П. Схемы 12- и 24-пульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций // Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГАПС, 1995. Вып. 3 (85). С. 55–70.
10. Неугодников Ю. П., Неугодников И. П. Оценка энергетических показателей 12- и 24-пульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций // Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГАПС, 1995. Вып. 3 (85). С. 71–82.
11. Неугодников Ю. П., Неугодников А. Ю. Энергетические показатели 12- и 24-пульсовых инверторов и управляемых выпрямителей тяговых подстанций // Разработка и совершенствование электрооборудования для систем тягового электроснабжения железных дорог : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. Вып. 70 (153). С. 66–78.
12. Неугодников Ю. П. Аварийные режимы многопульсовых инверторных преобразователей тяговых подстанций // Повышение надежности работы устройств электроснабжения железных дорог : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГУПС, 2000. Вып. 13 (95). С. 121–131.
13. Неугодников Ю. П., Неугодников И. П. Оценка предельных токов 24-пульсовых инверторных преобразователей тяговых подстанций // Наука и транспорт сегодня: проблемы и решения : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГАПС, 1996. Вып. 5 (87). Ч. 1. С. 52–58.
14. Неугодников И. П., Соколов С. Д. Аварийные режимы двенадцатифазного инвертора тяговой подстанции // Вестник ВНИИЖТ. 1988. № 6. С. 19–22. ISSN 2223–9731.
15. Неугодников И. П. Токи циркуляции в двенадцатифазных схемах непереключаемых выпрямительно-инверторных преобразователей // Вестник ВНИИЖТ. 1987. № 8. С. 21–25. ISSN 2223–9731.
16. Программа повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава Свердловской железной дороги — филиала ОАО «Российские железные дороги» : отчет по НИР / УрГУПС ; рук. Неугодников Ю. П. Екатеринбург, 2012. 200 с.

I. P. Neugodnikov // Actual problems of security on railway transport : collection of scientific papers. Ekaterinburg : URGAPS, 1994. Issue 1 (83). Pp. 142–150.

9. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov V. P. Schemes of 12-pulse and 24-pulse rectifying and inverter transformers of traction substations [Skhemy 12- i 24-pul'sovyykh vypryamitel'no-invertornykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Energy-saving technologies on railway transport : collection of scientific papers. Ekaterinburg : URGAPS, 1995. Issue 3 (85). Pp. 55–70.
10. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov I. P. Assessment of energy indicators of 12-pulse and 24-pulse rectifying and inverter transformers for traction substations [Otsenka energeticheskikh pokazateley 12- i 24-pul'sovyykh vypryamitel'no-invertornykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Energy-saving technologies on railway transport : collection of scientific papers. Ekaterinburg : URGAPS, 1995. Issue 3 (85). Pp. 71–82.
11. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov A. Yu. Energy indicators of 12-pulse and 24-pulse inverters and controlled rectifiers of traction substations [Energeticheskie pokazateli 12- i 24-pul'sovyykh invertorov i upravlyаемых выпрямителей тяговых подстанций] // Development and improvement of electric equipment for railway power supply system : collection of scientific papers. Ekaterinburg : USURT, 2009. Issue 70 (153). Pp. 66–78.
12. Neugodnikov Yu. P. Emergency states of multi-pulse inverter transformers for traction substations [Avariynnye rezhimy mnogopul'sovyykh invertornykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Increase of operation reliability of railway power supply system equipment : collection of scientific papers. Ekaterinburg : USURT, 2000. Issue 13 (95). Pp. 121–131.
13. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov I. P. Assessment of limiting currents for 24-pulse inverter transformers of traction substations [Otsenka predel'nykh tokov 24-pul'sovyykh invertornykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Science and transport today: problems and solutions : collection of scientific papers. Ekaterinburg : URGAPS, 1996. Issue 5 (87). Part 1. Pp. 52–58.
14. Neugodnikov I. P., Sokolov S. D. Emergency states of 12-phase inverter of traction substations [Avariynnye rezhimy dvenadtsatfaznogo invertora tyagovoy podstantsii] // VNIIZhT Scientific Journal. 1988. No. 6. Pp. 19–22. ISSN 2223–9731.
15. Neugodnikov I. P. Circulation currents in 12-phase schemes of non-switchable rectifying and inverter transformers [Toki tsirkulyatsii v dvenadtsatfaznykh skhemakh nepereklyuchaemykh vypryamitel'no-invertornykh preobrazovateley] // VNIIZhT Scientific Journal. 1987. No. 8. Pp. 21–25. ISSN 2223–9731.
16. Program for increase of energy efficiency of power supply system and electric rolling stock on the Sverdlovsk Railway — branch of the JSC Russian Railways [Programma povysheniya energoeffektivnosti sistema tyagovogo elektrosnabzheniya i elektropodvizhnogo sostava Sverdlovskoy zheleznoy dorogi — filiala OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi»] : report on research work / USURT ; executive Neugodnikov Yu. P. Ekaterinburg, 2012. 200 p.

Объем статьи 0,53 авторских листа

УДК 656.212.5

Александр Андреевич Бородин, аспирант Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ НА ФОРМИРОВАНИЕ «БАРЬЕРНЫХ ГРУПП» ВАГОНОВ

Alexander Andreevich Borodin, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Method for calculation of additional time consumption on making-up of «barrier car groups»

Аннотация

Предложена методика расчета дополнительных затрат времени на формирование «барьерных групп» вагонов, используемых в качестве заграждающих средств на подгорочных путях. Методика позволяет выбрать оптимальный способ формирования «барьерных групп», оценить целесообразность их применения в качестве заграждающих средств и сравнить эту технологию с альтернативными способами предотвращения выхода подвижного состава за пределы полезной длины сортировочных путей. Исследованы взаимозависимости параметров сортировочной работы и затрат времени на формирование «барьерных групп» вагонов.

Ключевые слова: сортировочная станция, «барьерная группа», затраты времени, параметры сортировочной работы.

Summary

The paper proposes a method for calculation of additional time consumption on making-up of «barrier car groups» used as protecting facilities on classification tracks. The method allows selecting an optimal way of making-up of «barrier groups», assessing the expediency of their application as a protecting facility and comparing this technology with alternative means of preventing the overrun of rolling stock beyond the limits of the effective length of classification tracks. As a result, the author has studied interdependencies of classification work parameters and time consumption on making-up of «barrier car groups».

Keywords: marshalling station, «barrier group», time consumption, parameters of classification work.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-109-115

ВВЕДЕНИЕ

Перерабатывающая способность сортировочных станций зависит от их технического оснащения и технологии работы, в том числе от применяемой технологии расформирования составов на сортировочной горке. На перерабатывающую способность горки влияют следующие факторы: режимы роспуска, скорости надвига и роспуска составов, количество вынужденных остановок роспуска, структура потока отцепов, особенности выполнения маневровой работы в сортировочном парке и др.

При этом первоочередной задачей функционирования горочных комплексов является безопасность сортировочного процесса. Для исключения опасных состояний процесса расформирования-формирования поездов (таких как выход неуправляемого подвижного состава за пределы полезной длины пути, взрез стрелок, столкновение) пути подгорочных парков должны быть оборудованы стационарными заграждающими средствами, установка которых требует значительных капиталовложений и дополнительных затрат на обслуживание.

В настоящее время на большинстве сортировочных станций в качестве средств, предотвращающих выход подвижного состава за пределы полезной длины путей подгорочных парков, используются «барьерные группы» вагонов [1]. Формирование «барьерных групп» на свободных сортировочных (сортировочно-отправочных) путях до начала роспуска требует выполнения дополнительной маневровой работы, что неизбежно ведет к снижению перерабатывающей способности сортировочных горок и станций в целом.

Для оценки целесообразности использования «барьерных групп» в качестве заграждающих средств, определения эксплуатационных издержек, связанных с их формированием, а также для анализа влияния этих издержек на общие показатели работы станции автором была создана методика расчета дополнительных затрат времени на формирование «барьерных групп» вагонов.

ВЫВОД АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ И РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ

В соответствии с технологическими особенностями работы железнодорожных станций по постановке и закреплению «барьерных групп» вагонов на сортировочных путях, изложенными в [2], рассмотрим возможные способы формирования «барьерных групп» и их установки на сортировочных (сортировочно-отправочных) путях*.

*Все формулы получены с использованием требований и рекомендаций действующих нормативных документов ОАО «РЖД» [3, 4].

1. Формирование «барьерной группы» в процессе накопления состава из последних отцепов (вагонов), следующих на этот путь

1.1. Технологические особенности формирования «барьерных групп» на сортировочном пути (рис. 1)

Суммарное время занятия сортировочной горки расформированием составов не увеличивается.

Дополнительные затраты времени на маневровую работу по формированию «барьерной группы» будут определяться по следующей формуле, мин:

$$t_{(1)}^{БГ} = \left[\frac{n_{БГ}}{n_{отц}^{ср}} \right] \cdot I_{назн} + t_3^{БГ} + t_{отцепка} \quad (1)$$

где $\left[\frac{n_{БГ}}{n_{отц}^{ср}} \right]$ — количество дополнительных роспусков отцепов с сортировочной горки, которое требуется совершить, чтобы сформировать «барьерную группу», определяется округлением частного от деления потребного количества вагонов в «барьерной группе» $n_{БГ}$ на среднюю длину распускаемого на заданный путь отцепа $n_{отц}^{ср}$ до целого числа в большую сторону;

$I_{назн}$ — средний интервал поступления в подсистему расформирования-формирования отцепов (вагонов) на назначение, мин;

$t_3^{БГ}$ — время на закрепление вагонов «барьерной группы», мин;

$t_{отцепка}$ — время на отцепку «барьерной группы» от переставляемого в парк отправления состава, мин.

В соответствии с [4] средняя длина отцепа может быть получена по формуле, ваг:

$$n_{отц}^{ср} = \frac{m_{пр} \cdot \sqrt{N_i}}{(3,1 + 0,014 \cdot N_i) \cdot k} \quad (2)$$

где $m_{пр}$ — средняя величина прибывающего состава в сортировочную систему, ваг;

N_i — среднесуточный вагонопоток назначения, ваг;

k — количество назначений в сортировочной системе, включая местные назначения.

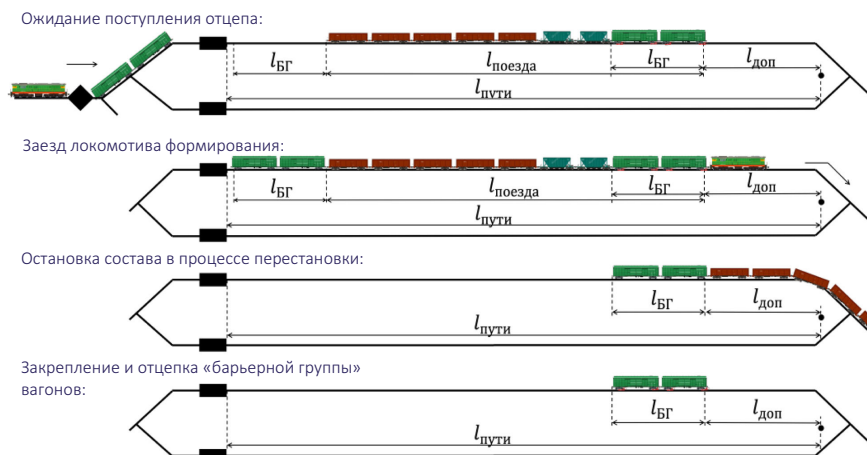


Рис. 1. Формирование «барьерной группы» на сортировочном пути в процессе накопления состава из последних отцепов (вагонов), следующих на этот путь

В этом случае средний интервал $I_{назн}$ рассчитывается по формуле

$$I_{назн} = \frac{1440 \cdot n_{отц}^{ср}}{N_i} \quad (3)$$

Время на закрепление «барьерной группы» вагонов определяется следующим образом:

$$t_3^{БГ} = 1,1 \cdot \left[\frac{K_{БГ}}{K_{ящ}} \right] + 0,06 \cdot K_{БГ} + 0,01 \cdot \left[\frac{K_{БГ}}{2} \right] \cdot I_{ваг} + 0,3, \quad (4)$$

где 1,1 — время на открытие одного ящика с тормозными башмаками, мин;

$\left[\frac{K_{БГ}}{K_{ящ}} \right]$ — количество ящиков с тормозными башмаками,

которые требуется открыть, определяемое округлением частного от деления потребной нормы закрепления «барьерной группы» $K_{БГ}$ на количество тормозных башмаков в одном ящике $K_{ящ}$ до целого числа в большую сторону;

0,06 · $K_{БГ}$ — время на укладку $K_{БГ}$ тормозных башмаков без наката, мин;

0,01 · $\left[\frac{K_{БГ}}{2} \right] \cdot I_{ваг}$ — время на прохождение работником расстояния в процессе укладки тормозных башмаков в соответствии с [3], мин;

$I_{ваг}$ — длина условного вагона ($I_{ваг} = 14$ м);

0,3 — время на доклад о закреплении, мин.

Время на отцепку «барьерной группы» от переставляемого в парк отправления (отправляемого с путей сортировочно-отправочного парка) состава определяется по формуле

$$t_{отцепка} = 0,01 \cdot \left[\frac{K_{БГ}}{2} \right] \cdot I_{ваг} + 0,08, \quad (5)$$

где $0,01 \cdot \left[\frac{K_{БГ}}{2} \right] \cdot I_{ваг}$ — время на прохождение работника от места укладки последнего тормозного башмака до места расцепления «барьерной группы» и переставляемого состава, мин;

0,08 — время на расцепление, мин.

1.2. Технологические особенности формирования «барьерных групп» на сортировочно-отправочном пути

Суммарное время занятия сортировочной горки расформированием составов не увеличивается.

Возможны два варианта реализации этого способа.

1. Закрепление остающейся на пути «барьерной группы», отцепка сформированного состава, отправление сформированного состава с путей сортировочно-отправочного парка, после этого — заезд маневрового локомотива со стороны вытяжек формирования и перестановка вагонов к месту установки «барьерной группы» (рис. 2).

В этом случае дополнительные затраты времени на маневровую работу по формированию «барьерной группы» на сортировочно-отправочном пути могут быть определены по следующей формуле, мин:

$$t'_{(ICO)БГ} = \left[\frac{n_{БГ}}{n_{Отц}} \right] \cdot (I_{назн} + t_3) + t'_{Отцепка} + t_{заезда} + t_{сн.з} + t'_{подт(ос)} + t_3^{БГ} + t''_{Отцепка}, \quad (6)$$

где t_3 — время на закрепление группы вагонов за парковой тормозной позицией двумя тормозными башмаками, 1 мин;

$t'_{Отцепка}$ — время на отцепку «барьерной группы» вагонов от отправляемого с путей сортировочно-отправочного парка состава, мин;

$t_{заезда}$ — время заезда маневрового локомотива на сортировочный путь со стороны вытяжек формирования, мин;

$t_{сн.з}$ — время уборки двух тормозных башмаков из-под группы вагонов, 1 мин;

$t'_{подт(ос)}$ — время на подтягивание «барьерной группы», остающейся на сортировочно-отправочном пути после отправления поезда до места ее установки, мин;

$t''_{Отцепка}$ — время на отцепку «барьерной группы» вагонов от маневрового локомотива, мин, определяется по формуле (5).

$$t'_{Отцепка} = 0,01 \cdot n_{форм} \cdot l_{ваг} + 0,08, \quad (7)$$

где $0,01 \cdot n_{форм} \cdot l_{ваг}$ — время на прохождение работника до места расцепления «барьерной группы» и отправляемого состава в соответствии с [3], мин;

0,08 — время на расцепление, мин.

$$t'_{подт(ос)} = \left((\alpha_{рт} + \beta_{рт} \cdot n_{БГ}) \cdot \frac{v_{подт(ос)}}{2} + 3,6 \frac{l_{подт(ос)}}{v_{подт(ос)}} \right) / 60, \quad (8)$$

где $\alpha_{рт}$ — коэффициент, учитывающий время, необходимое для изменения скорости движения локомотива на 1 км/ч при разгоне, и время, необходимое для изменения скорости движения локомотива на 1 км/ч при торможении, $\alpha_{рт} = 0,76$ с/(км/ч);

$\beta_{рт}$ — коэффициент, учитывающий дополнительное время на изменение скорости движения каждого вагона в маневровом составе на 1 км/ч при разгоне и дополнительное время на изменение скорости движения каждого вагона в маневровом составе на 1 км/ч при торможении, $\beta_{рт} = 0,13$ с/(км/ч);

$v_{подт(ос)}$ — допустимая скорость подтягивания (осаживания) группы вагонов, км/ч;

$l_{подт(ос)}$ — длина полурейсы подтягивания (осаживания), м;

3,6 — коэффициент перевода км/ч в м/с;

60 — коэффициент перевода секунд в минуты.

Время заезда определяется по формуле

$$t_{заезда} = \left(\alpha_{рт} \cdot \frac{v_{заезда}}{2} + 3,6 \frac{l_{заезда}}{v_{заезда}} \right) / 60, \quad (9)$$

где $v_{заезда}$ — допустимая скорость заезда маневрового локомотива за группой вагонов, км/ч;

$l_{заезда}$ — длина полурейсы заезда, м.

2. Если в момент формирования «барьерной группы» горочный локомотив не занят другими операциями, производится его заезд за парковую тормозную позицию с прицепкой к сформированному составу и «барьерной группе». После отцепки и отправления сформированного состава выполняется осаживание «барьерной группы» до места ее установки и последующее закрепление (рис. 3).

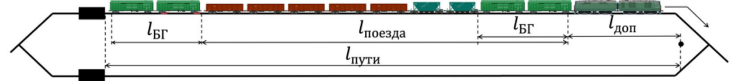
В этом случае дополнительные затраты времени на маневровую работу по формированию «барьерной группы» на сортировочно-отправочном пути будут определяться по следующей формуле, мин:

$$t'_{(ICO)БГ} = \left[\frac{n_{БГ}}{n_{Отц}} \right] \cdot I_{назн} + t'_{заезда} + t'_{Отцепка} + t_{ос} + t_3^{БГ} + t''_{Отцепка}, \quad (10)$$

Ожидание поступления отцепки:



Отправление поезда с сортировочно-отправочного пути:



Заезд маневрового локомотива, уборка т.б., подтягивание «барьерной группы» к месту ее установки, закрепление, отцепка:

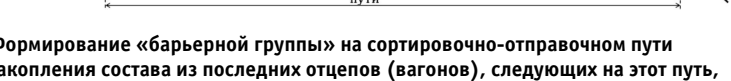
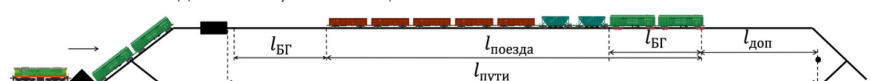
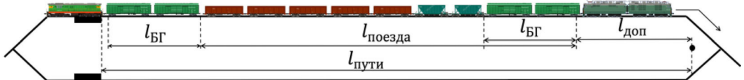


Рис. 2. Формирование «барьерной группы» на сортировочно-отправочном пути в процессе накопления состава из последних отцепов (вагонов), следующих на этот путь, с использованием локомотива района формирования

Ожидание поступления отцепки:



Отправление поезда с сортировочно-отправочного пути:



Осаживание «барьерной группы» к месту ее установки, закрепление, отцепка:

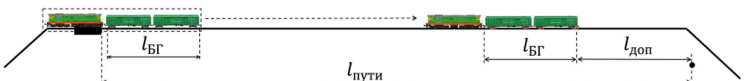


Рис. 3. Формирование «барьерной группы» на сортировочно-отправочном пути в процессе накопления состава из последних отцепов (вагонов), следующих на этот путь, без использования маневрового локомотива вытяжек формирования

где $t'_{\text{заезда}}$ — время заезда горочного локомотива на сортировочный путь со стороны горки, рассчитывается по формуле (9);
 $t_{\text{ос}}$ — время на осаживание «барьерной группы», остающейся на сортировочно-отправочном пути после отправления поезда до места ее установки, рассчитывается по формуле (8).

Для данного варианта $t'_{\text{отцепка}} = t'_{\text{отцепка}}$ так как отцепка «барьерной группы» от отправляемого состава будет производиться горочным составителем поездов.

2. Формирование «барьерной группы» путем отцепки группы вагонов от распускаемого состава у вершины горки и перестановки их к месту установки «барьерной группы» дополнительно привлекаемым локомотивом (рис. 4)

Дополнительные затраты времени на маневровую работу по формированию «барьерной группы» будут определяться по следующей формуле, мин:

$$t_{(2)}^{\text{БГ}} = \left[\frac{n_{\text{БГ}}}{n_{\text{отц}}} \right] \cdot (t_{\text{заезда}} + t_{\text{снятие}} + t_{\text{подт}} + t_{\text{з}}^{\text{БГ(отц)}} + t_{\text{отцепка}}) + \left(\left[\frac{n_{\text{БГ}}}{n_{\text{отц}}} \right] - 1 \right) \cdot I_{\text{назн}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{заезда}}$ — время заезда маневрового локомотива на вершину горки со стороны вытяжек формирования, определяется по формуле (9);

$t_{\text{снятие}}$ — время на «снятие» вагонов «барьерной группы» у вершины горки дополнительно привлекаемым локомотивом, как для вагонов ЗСГ, определяется в соответствии с табл. 2.2.9 [3];

$t_{\text{подт}}$ — время на подтягивание «барьерной группы» до места ее установки, рассчитывается по формуле (8);

$t_{\text{з}}^{\text{БГ(отц)}}$ — время на закрепление вагонов «барьерной группы» (отцепов), определяется по формуле (4);

$t_{\text{отцепка}}$ — время на отцепку «барьерной группы» от маневрового локомотива, определяется по формуле (5).

Дополнительное время занятия сортировочной горки выполнению маневровой работы по формированию «барьерной группы» будет рассчитываться по следующей формуле, мин:

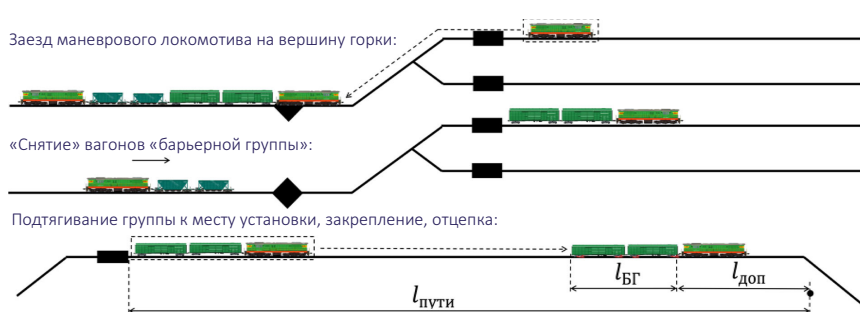


Рис. 4. Формирование «барьерной группы» путем отцепки вагонов от распускаемого состава у вершины горки и перестановки их к месту установки «барьерной группы» дополнительно привлекаемым локомотивом

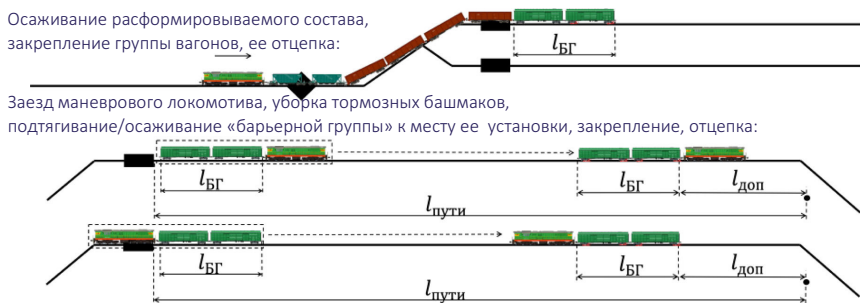


Рис. 5. Формирование «барьерной группы» путем осаживания расформировываемого состава, отцепки «барьерной группы» вагонов с последующим ее подтягиванием (осаживанием) к месту установки

$$t_{\text{гор(2)}}^{\text{доп}} = \left[\frac{n_{\text{БГ}}}{n_{\text{отц}}} \right] \cdot (t_{\text{снятие}} + t'_{\text{заезда}}), \quad (12)$$

где $t'_{\text{заезда}}$ — время заезда маневрового локомотива по горочной горловине на вершину горки, определяется по формуле (9) для горочной горловины.

3. Формирование «барьерной группы» путем осаживания расформировываемого состава, отцепки «барьерной группы» вагонов с последующим ее подтягиванием (осаживанием) к месту установки (рис. 5)

Данный способ будет использоваться в том случае, если в момент расформирования состава на сортировочной горке маневровый локомотив вытяжек формирования занят выполнением других операций и не может произвести «снятие» вагонов «барьерной группы».

Затраты времени на маневровую работу по формированию «барьерной группы» будут определяться по следующей формуле, мин:

$$t_{(3)}^{\text{БГ}} = \left[\frac{n_{\text{БГ}}}{n_{\text{отц}}} \right] \cdot (t_{\text{ос}}^{\text{расф}} + t_{\text{отцепка}}) + \left(\left[\frac{n_{\text{БГ}}}{n_{\text{отц}}} \right] - 1 \right) \cdot I_{\text{назн}} + t_{\text{з}} + t_{\text{заезда}} (t'_{\text{заезда}}) + t_{\text{сн.з}} + t_{\text{подт(ос)}} + t_{\text{з}}^{\text{БГ}} + t_{\text{отцепка}}, \quad (13)$$

где $\left[\frac{n_{\text{БГ}}}{n_{\text{отц}}} \right]$ — количество осаживаний,

которое требуется совершить, чтобы сформировать «барьерную группу»;

$t_{\text{ос}}^{\text{расф}}$ — время на осаживание расформировываемого маневрового состава за разделительную стрелку, как для вагонов ЗСГ, определяется в соответствии с таблицей 2.2.8 [3];

$t_{\text{отцепка}}$ — время на отцепку «барьерной группы» (отцепа) от расформировываемого маневрового состава или маневрового локомотива, определяется по формуле (5);

$I_{\text{назн}}$ — интервал поступления в подсистему расформирования-формирования отцепов (вагонов) на заданное назначение;

t_3 — время на закрепление группы вагонов за парковой тормозной позицией двумя тормозными башмаками в случае ее недостаточности для формирования «барьерной группы», 1 мин;

$t_{заезда}(t'_{заезда})$ — время заезда маневрового (горочного) локомотива на сортировочный путь со стороны вытяжек формирования (со стороны горки), определяется по формуле (9);

$t_{сн.з}$ — уборка двух тормозных башмаков из-под группы вагонов, 1 мин;

$t_{подт(ос)}$ — время на подтягивание (осаживание) «барьерной группы» до места ее установки, определяется по формуле (8);

$t_3^{БГ}$ — время на закрепление вагонов «барьерной группы» (отцепки), определяется по формуле (4).

Если перестановка «барьерной группы» к месту ее установки выполняется локомотивом вытяжек формирования, то в формуле (13) используется $t_{заезда}$ а если горочным локомотивом, то $t'_{заезда}$. Выбор локомотива для перестановки осуществляется в оперативных условиях в зависимости от загрузки и степени занятости локомотивов на данный момент времени.

Дополнительное время занятия сортировочной горки выполнением маневровой работы по формированию «барьерной группы» будет определяться по следующей формуле, мин:

$$t_{гор(3)}^{доп} = k_{отц}^{сост} \times (t_{ос}^{расф} + t_{отцепка} + t_3 + t_{выт}^{расф}), \quad (14)$$

где $k_{отц}^{сост}$ — количество отцепов в расформируемом составе назначении на данный путь;

$t_{выт}^{расф}$ — время на вытягивание расформируемого маневрового состава обратно на сортировочную горку, определяемое по формуле

$$t_{выт}^{расф} = \left((\alpha_{рт} + \beta_{рт} \cdot (n_{расф} - n_{БГ})) \times \left(\frac{v_{выт}}{2} + 3,6 \frac{l_{спуск}}{v_{выт}} \right) \right) / 60, \quad (15)$$

где $v_{выт}$ — допустимая скорость вытягивания расформируемого состава на сортировочную горку, км/ч;

$t_{расф}$ — количество вагонов в расформируемом маневровом составе;

$n_{БГ}$ — количество вагонов в «барьерной группе»;

$l_{спуск}$ — длина спускной части горки (от вершины горки до парковой тормозной позиции), м.

Все конечные значения затрат времени на маневровую работу по формированию «барьерных групп» и дополнительно времени занятия сортировочной горки выполнением маневровой работы по формированию «барьерных групп» округляются до целых минут в большую сторону.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРАКТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

С использованием рассмотренной методики автором были проведены многофакторные расчеты для сортировочной станции Рыбное Московской железной дороги. По результатам расчетов установлено, что оптимальным для формирования «барьерных групп» вагонов на путях подгорочных парков является способ № 2 — отцепка от распускаемого состава у вершины горки и перестановка дополнительно привлекаемым вторым локомотивом. Этот способ требует минимальных затрат времени на формирование «барьерной группы» (рис. 6).

Однако в оперативных условиях, когда во время расформирования состава локомотив вытяжек формирования занят выполнением других работ и не может осуществить «снятие» вагонов «барьерной группы», эффективнее будет использование способа № 3 — формирование «барьерной группы» путем осаживания расформируемого состава, отцепки «барьерной группы» и последующего вытягивания расформируемого состава обратно на горку. Дальнейшая перестановка «барьерной группы» к месту ее установки осуществляется локомотивом вытяжек формирования или горочным в зависимости от оперативных условий.

Несмотря на то что первый способ, т. е. формирование «барьерной группы» на сортировочном/сортировочно-отправочном пути в процессе накопления состава из последних отцепов (вагонов), следующих на этот путь, не повышает временные затраты на занятие сортировочной горки, тем не менее, он приводит к увеличению времени простоя вагонов под накоплением на путях подгорочного парка станции Рыбное, так как количество накапливаемых вагонов увеличивается на величину «барьерной группы».

С другой стороны, в оперативных условиях, когда отцеп (или отцепы), из ко-

	Затраты времени на формирование «барьерной группы» вагонов, мин			Увеличение времени роспуска, мин	
	Способ 1	Способ 2	Способ 3	Способ 2	Способ 3
Сортировочный парк «Б», благоприятные погодные условия	60–200	12	16–17	4	10
Сортировочный парк «Б», неблагоприятные погодные условия	60–200	12–13	16–18	4	10
Сортировочно-отправочный парк «В», благоприятные погодные условия	70–800	10–12	14–16	4	8
Сортировочно-отправочный парк «В», неблагоприятные погодные условия	70–800	11–12	14–16	4	8–9

Большие затраты времени из-за больших интервалов поступления отцепов на сортировочный путь

Способ №1 дает эффективность в сравнении со способом №2 при интервалах поступления отцепов на сортировочный путь не более 5–6 мин

Наиболее эффективен способ №2 «Отцепка «барьерной группы» вагонов у вершины горки и перестановка к месту ее установки дополнительно привлекаемым локомотивом»

Рис. 6. Анализ результатов практических расчетов по сортировочной станции Рыбное

того будет сформирована «барьерная группа», находится в одном расформируваемом составе с замыкающей группой вагонов для данного пути или когда интервал поступления отцепов на данный путь не превышает 5–6 мин, этот способ может давать наибольшую экономию времени по сравнению с остальными методами и, таким образом, быть эффективным инструментом для маневрового диспетчера и дежурного по сортировочной горке при работе с «барьерными группами» вагонов в сортировочном парке.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ СОРТИРОВОЧНОЙ РАБОТЫ И ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ НА ФОРМИРОВАНИЕ «БАРЬЕРНЫХ ГРУПП» ВАГОНОВ

Для исследования взаимозависимостей параметров сортировочной работы и затрат времени на формирование «барьерных групп» вагонов выполнено моделирование работы сортировочной станции Рыбное путем построения вариантных суточных планов-графиков и проанализированы следующие показатели:

- коэффициент загрузки сортировочных горок;
- коэффициент загрузки горочных локомотивов;
- коэффициент загрузки маневровых локомотивов формирования;
- средний простой в парке приема от момента прибытия до начала расформирования состава.

Повышение загрузки сортировочной горки связано с увеличением времени роспуска отдельных составов, вызванным необходимостью выполнения дополнительных операций по формированию «барьерных групп» вагонов (рис. 7):

$$\Psi_{\text{Гор}} = f(t_{\text{Гор(сут)}}^{\text{доп}}), \quad (16)$$

где $t_{\text{Гор(сут)}}^{\text{доп}}$ — дополнительное время занятия сортировочной горки, связанное с выполнением маневровой работы по формированию «барьерных групп» за сутки, мин/сут,

$$t_{\text{Гор(сут)}}^{\text{доп}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 t_{\text{Гор}(i,j)}^{\text{доп}} \cdot K_{\text{форм.БГ}(i,j)}, \quad (17)$$

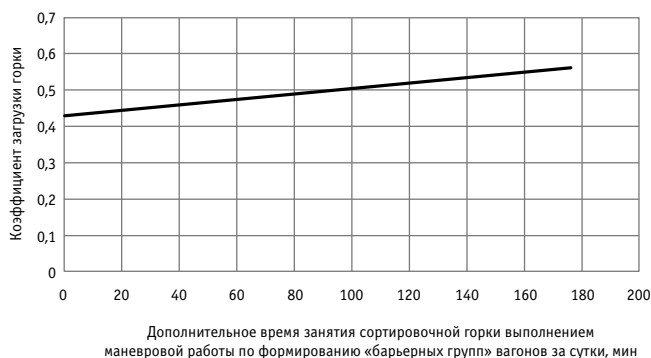


Рис. 7. Зависимость коэффициента загрузки горки от дополнительного времени занятия сортировочной горки выполнением маневровой работы по формированию «барьерных групп» за сутки

где $t_{\text{Гор}(i,j)}^{\text{доп}}$ — дополнительное время занятия сортировочной горки, связанное с формированием «барьерной группы», на пути i по способу j , мин;

$K_{\text{форм.БГ}(i,j)}$ — количество «барьерных групп», сформированных на пути i по способу j за сутки;

n — число путей в подгорочном парке, на которых требуется формирование «барьерных групп» вагонов.

Увеличение загрузки горочного локомотива аналогично вызвано увеличением времени роспуска отдельных составов и необходимостью выполнения дополнительных операций, связанных с формированием «барьерных групп» (рис. 8):

$$\Psi_{\text{ман}}^{\text{Гор}} = f(t_{\text{Гор(сут)}}^{\text{доп}}). \quad (18)$$

Увеличение загрузки маневрового локомотива в районе формирования вызвано необходимостью непосредственного выполнения маневровой работы по формированию «барьерных групп» вагонов (рис. 9):

$$\Psi_{\text{ман}} = f(t_{\text{(сут)}}^{\text{БГ}}), \quad (19)$$

где $t_{\text{(сут)}}^{\text{БГ}}$ — дополнительные затраты времени на маневровую работу по формированию «барьерных групп» за сутки по сортировочной системе, мин/сут,

$$t_{\text{(сут)}}^{\text{БГ}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 t_{(i,j)}^{\text{БГ}} \cdot K_{\text{форм.БГ}(i,j)}, \quad (20)$$

где $t_{(i,j)}^{\text{БГ}}$ — дополнительные затраты времени на маневровую работу по формированию «барьерной группы» на пути i по способу j , мин;

$K_{\text{форм.БГ}(i,j)}$ — количество «барьерных групп», сформированных на пути i по способу j за сутки;

n — число путей в подгорочном парке, на которых требуется формирование «барьерных групп» вагонов.

Увеличение среднего времени простоя в парке приема от момента прибытия до начала расформирования вызвано ростом загрузки сортировочной горки из-за увеличения времени занятости горочного локомотива выполнением дополнительных маневровых операций (рис. 10):

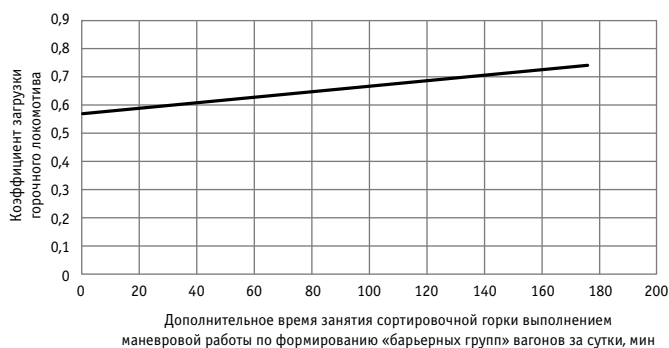


Рис. 8. Зависимость коэффициента загрузки горочного локомотива от дополнительного времени занятия сортировочной горки выполнением маневровой работы по формированию «барьерных групп» за сутки



$$t_{\text{ПП}} = f(t_{\text{гор(сут)}}^{\text{доп}}). \quad (21)$$

На основании выполненных расчетов для сортировочной станции Рыбное установлено:

при увеличении дополнительного времени занятия сортировочной горки выполнением маневровой работы по формированию «барьерных групп» вагонов до 176 мин/сут коэффициент загрузки горки увеличивается на 0,15, а коэффициент загрузки горочного локомотива — на 0,16;

при увеличении дополнительных затрат времени на маневровую работу по формированию «барьерных групп» вагонов до 350 мин/сут коэффициент загрузки маневрового локомотива формирования увеличивается на 0,27;

при существующих размерах перерабатываемого вагонотока дополнительная маневровая работа по формированию «барьерных групп» вагонов не оказывает существенного влияния на время среднего простоя составов разборочных поездов в парке приема станции Рыбное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика может быть использована для выбора оптимального способа формирования «барьерных групп» вагонов на всех горочных станциях, так как позволяет учесть особенности технического оснащения и технологии сортировочной работы конкретных станций.

Методика может применяться для оценки целесообразности использования «барьерных групп» в качестве заграждающих средств и для сравнения этой технологии с альтернативными способами предотвращения выхода подвижного состава за пределы полезной длины путей подгорочных парков.

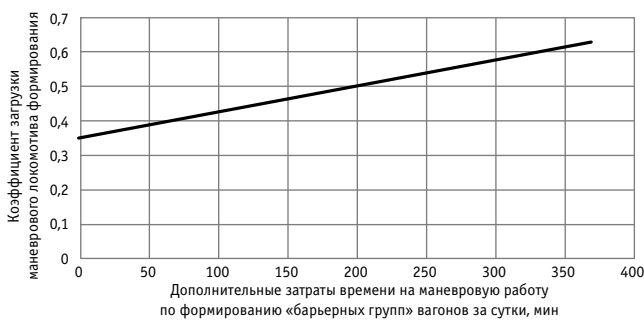


Рис. 9. Зависимость коэффициента загрузки маневрового локомотива формирования от суммарных дополнительных затрат времени на маневровую работу по формированию «барьерных групп» вагонов за сутки

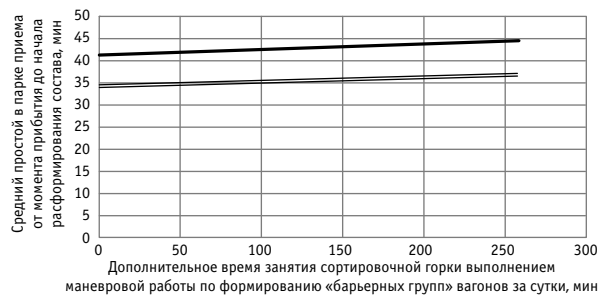


Рис. 10. Зависимость среднего времени простоя составов в парке приема с момента прибытия до начала расформирования от дополнительного времени занятия сортировочной горки выполнением маневровой работы по формированию «барьерных групп» за сутки
 — четная система; — нечетная система

Литература

1. Коваленко Н. А., Бородин А. А., Тарасов К. А. Факторы, определяющие величину и нормы закрепления «барьерных групп» // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 6 (85). С. 242–257. ISSN 1992–3252.
2. Kovalenko N., Borodin A. Ensuring the safety of breaking up and making up of freight trains // E3S Web of Conferences 164, 03010 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403010>.
3. Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад маневровых локомотивов : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 08.02.2007 г. Москва : Техинформ, 2007. 98 с.
4. Инструктивные указания по организации вагонотоков на железных дорогах ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 16.10.2006 г. Москва : Техинформ, 2007. 527 с.

Объем статьи 0,7 авторских листа

References

1. Kovalenko N. A., Borodin A. A., Tarasov K. A. Factors determining the size and norms for securing barrier wagon groups [Fakторы, opredelyayushhie velichinu i normy zakrepleniya «baryernykh grupp»] // World of Transport and Transportatio. 2019. Vol. 17. No. 6 (85). Pp. 242–257. ISSN 1992–3252.
2. Kovalenko N., Borodin A. Ensuring the safety of breaking up and making up of freight trains // E3S Web of Conferences 164, 03010 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403010>.
3. Time standards on shunting service carried out on railway stations of the JSC Russian Railways, standard number of shunting locomotive crews [Normy vremeni na manevrovyye raboty, vypolnyaemye na zheleznodorozhnykh stantsiyakh OAO «RZhD», normativy chislennosti brigad manevrovyykh lokomotivov] : approved by the Order of JSC «RZD» dated 08.02.2007. Moscow : Techinform, 2007. 98 p.
4. Guidance on car traffic organization on railways of the JSC «RZD» [Instruktivnye ukazaniya po organizatsii vagonopotokov na zheleznyykh dorogakh OAO «RZhD»] : approved by the Order of JSC «RZD» dated 16.10.2006. Moscow : Techinform, 2007. 527 p.

Подписка на 2022 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2022 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

ПВ	место	литер

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стоимость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	руб. ____ коп.	

на 2022 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 3 (70), 2021 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.09.2021 Выход в свет 21.10.2021

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–80) Формат 60×90/8

Цена 454 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 33

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2021

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 3 (70), 2021 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.09.2021 Выход в свет 21.10.2021

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–80) Формат 60×90/8

Цена 454 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 33

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2021