

ГОРОДСКОЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОБОЛОЧКИ КОТЛА НЕФТЕБЕНЗИНОВОЙ ЦИСТЕРНЫ ПРИ ПОЖАРЕ

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛИГОНА С ПОРОЖНИМ ВАГОНПОТОКОМ

МЕТОД РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ИНТЕНСИВНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛЕДОВОЙ БАЗЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ЕЕ ИНТЕГРАЦИЯ В МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННУЮ РЕКОНСТРУКЦИЮ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ



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	GENERAL TRANSPORT PROBLEMS
<i>В. Н. Шуть.</i> Городской автоматический транспорт 3	<i>V. N. Shut'.</i> Automatic urban transport..... 3
ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО	RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT
<i>А. В. Якушев.</i> Теория о деградации механических свойств литых сталей класса 20Л 8	<i>A. V. Yakushev.</i> Theory on degradation of mechanical properties of 20L cast steel 8
<i>Д. В. Зяблов, С. В. Беспалько, А. В. Зяблов.</i> Моделирование нестационарного температурного поля оболочки котла нефтебензиновой цистерны при пожаре 15	<i>D. V. Zyablov, S. V. Bespalko, A. V. Zyablov.</i> Modeling of non-steady thermal field of shell for oil and gasoline tank at fire..... 15
<i>В. А. Ханис, С. В. Беспалько, И. А. Ключиков, А. Л. Ханис, А. А. Ханис.</i> Модель обнаружения и оценки пожароопасности электропроводки пассажирского вагона по тепловому излучению 19	<i>V. A. Khanis, S. V. Bespalko, I. A. Klyuchikov, A. L. Khanis, A. A. Khanis.</i> Model for detection and analysis of fire risk of passenger car wiring by thermal radiation 19
ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ	CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION
<i>О. П. Югрин, Л. С. Жарикова.</i> Особенности работы железнодорожного полигона с порожним вагонопотоком 24	<i>O. P. Yugrina, L. S. Zharikova.</i> Features of operation of railway polygon with empty car traffic 24
ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА	ROLLING STOCK AND TRACTION
<i>А. П. Буйносов, А. Т. Шарапов, М. С. Чепижко.</i> Проектный расчет зубчатой передачи грузового электровоза с оптимальными параметрами корригирования 30	<i>A. P. Buynosov, A. T. Sharapov, M. S. Chepizhko.</i> Design calculation of gearwheel for freight electric locomotive with optimal parameters of correlation adjustment 30
<i>А. В. Бублик, В. В. Бублик, Н. В. Есин, О. В. Гателюк.</i> Снижение издержек при выборе технологического оборудования испытательного стенда вспомогательных электрических машин электроподвижного состава 35	<i>A. V. Bublik, V. V. Bublik, N. V. Esin, O. V. Gatelyuk.</i> Decrease of expanses at selection of technological equipment of inspection bench for auxiliary electrical machines of electric motive power 35
АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ	AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION
<i>Б. В. Рожкин.</i> Неточности оценки тепловых режимов дроссель-трансформаторов 41	<i>B. V. Rozhkin.</i> Inaccuracies of assessment of thermal modes for impedance bonds 41
ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK
<i>Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, А. В. Савин, И. В. Шишкина, М. Е. Березовский.</i> Метод расчета необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования 46	<i>B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, A. V. Savin, I. V. Shishkina, M. E. Berезovskiy.</i> Method for calculation of required strength of railway track with the consideration for intensity of its use 46
<i>Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев, Н. А. Клековкина, В. С. Кусков.</i> Принципы определения необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования 53	<i>B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, V. V. Korolev, N. A. Klekovkina, V. S. Kuskov.</i> Principles of determination of required railway track strength with the consideration for intensity of its use 53
<i>А. В. Петряев, В. Н. Парамонов.</i> Расчетный анализ поведения подпального основания при его стабилизации геосинтетическими материалами 62	<i>A. V. Petryaev, V. N. Paramonov.</i> Design analysis of sleeper bearing behaviour at stabilization by geosynthetic materials..... 62
<i>А. В. Петряев, Е. В. Федоренко.</i> Численное моделирование взаимодействия геосинтетического материала с грунтом подпального основания 68	<i>A. V. Petryaev, E. V. Fedorenko.</i> Numerical modeling of interaction of geosynthetic material with sleeper bearing ground..... 68
АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ	MOTOR TRANSPORT
<i>Е. В. Голов, С. А. Евтюков, А. П. Андреев, Е. В. Сорочкина.</i> Формирование трехмерной пространственно-следовой базы исходных данных с использованием сканирующих беспилотных летательных аппаратов и ее интеграция в модельно-ориентированную реконструкцию дорожно-транспортных происшествий 74	<i>E. V. Golov, S. A. Evtjukov, A. P. Andreev, E. V. Sorockina.</i> Creation of 3D spatial and tracking base of initial data with the use of scanning unmanned aerial vehicles and its integration into model-oriented reconstruction of traffic accidents..... 74
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА	ELECTRIC TRACTION
<i>Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова.</i> Анализ волновых процессов в тяговой сети переменного тока на основе имитационного моделирования 80	<i>T. V. Kovaleva, A. A. Komyakov, O. O. Komyakova, N. V. Pashkova.</i> Analysis of wave processes in alternating current traction power system on the basis of simulation modeling 80
<i>А. В. Ларченко, В. Г. Литвинцев, С. З. Овсейчик.</i> Пуск тягового электродвигателя — универсальное тестовое воздействие 86	<i>A. V. Larchenko, V. G. Litvintsev, S. Z. Ovseychik.</i> Starting of electric traction motor — general-purpose testing action 86
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ	ELECTRIC SUPPLY
<i>В. Г. Литвинцев, А. В. Ларченко.</i> Исследование комплексного влияния эксплуатационных показателей на потери электрической энергии в контактной сети 93	<i>V. G. Litvintsev, A. V. Larchenko.</i> Study of complex influence of operating indicators on energy losses in catenary 93

УДК 004.94:656.11

Василий Николаевич Шуть, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных интеллектуальных технологий Брестского государственного технического университета (БрГТУ), Брест, Республика Беларусь

ГОРОДСКОЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

Vasilyi Nikolaevich Shut', PhD in Engineering, Associate Professor, Intelligent Information Technologies Department, Brest State Technical University (BrSTU), Brest, Republic of Belarus

Automatic urban transport

Аннотация

Развитие информационных технологий позволяет пересмотреть концепцию организации современного городского транспорта и свести все его многообразие к одной единице номинальной вместимости — инфобусу. Инфобус — это беспилотный электрокар небольшой вместимости (до 30 пассажиров). На его базе разработан проект интеллектуальной транспортной системы массовой перевозки пассажиров. Данный тип общественного транспорта полностью автоматический, направлен на повышение качества и гибкости организации перевозки пассажиров, кроме того, он отличается значительными экономическими выгодами, так как по производительности перевозок приближается к производительности метро, но в то же время характеризуется более низкой стоимостью изготовления и обслуживания.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система, информационный транспорт, организация перевозок, матрица корреспонденций, координирующий сервер.

Summary

Development of information technologies allows revising a concept of organization of modern urban transport and its control. Meanwhile, it is possible to eliminate and to reduce all urban passenger vehicles to a single transportation unit with nominal capacity called an infobus. The infobus is an unmanned electric car with small capacity (up to 30 passengers). On its basis the author has developed a design of an intelligent transportation system for mass transportation of passengers. This type of public transport is fully automatic and is designed for the increase of quality and flexibility of passenger traffic organization. Besides, it differs by significant economic benefits because its performance is approaching the performance of metro, but at the same time the infobus is characterized by lower cost of production and maintenance.

Keywords: intelligent transportation system, information transport, traffic organization, correspondence matrix, coordinating server.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-3-7

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время представления о том, как должна выглядеть эффективная и комфортная транспортная система, соответствующая задачам развития современного города, претерпели значительные изменения. Новые стандарты транспортной доступности в городах, т.е. то, что горожанин будет тратить на дорогу не более 30 мин в день вне зависимости от того, в какую точку он хочет поехать и каким видом транспорта собирается воспользоваться, еще 20–30 лет назад были немыслимы [1].

Конкурентоспособность городов напрямую зависит от уровня развития в них транспортной инфраструктуры и транспортной системы, так как успешное функционирование транспорта влияет на экономическую, социальную и экологическую составляющие устойчивого развития. Соответственно хорошо спланированная и надежно функционирующая система общественного транспорта представляет собой краеугольный камень городской политики [2]. При этом, для того чтобы пересадить городских жителей с личного транспорта на общественный, необходимо предоставить им такой транспорт, потребительские качества которого будут близки или даже превысят потребительские качества личного транспорта. Одно из базовых качеств личного транспорта — почти нулевое время ожидания (спуститься с этажа и завести автомобиль). Второе важное качество — безостановочный проезд из пункта отправления до пункта назначения. Все это может обеспечить и городской автоматический транспорт. К тому же он имеет одно существенное преимущество, присущее общественному транспорту, — высокую провозную способность. Помимо прочего, экономичность такого транспорта по перевозке пассажиров на порядок выше, чем у личного и общественного.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На практике для характеристики потребностей городского населения в перевозках и систематического анализа условий перевозки применяется такая категория, как пассажиропоток [3], который характеризуется интенсивностью (средним количеством пассажиров, перевозимых в единицу времени).

На каждом маршруте могут быть задействованы транспортные средства одной или разной вместимости. Выбор и обоснование необходимой вместимости транспортного средства — сложная управленческая задача.

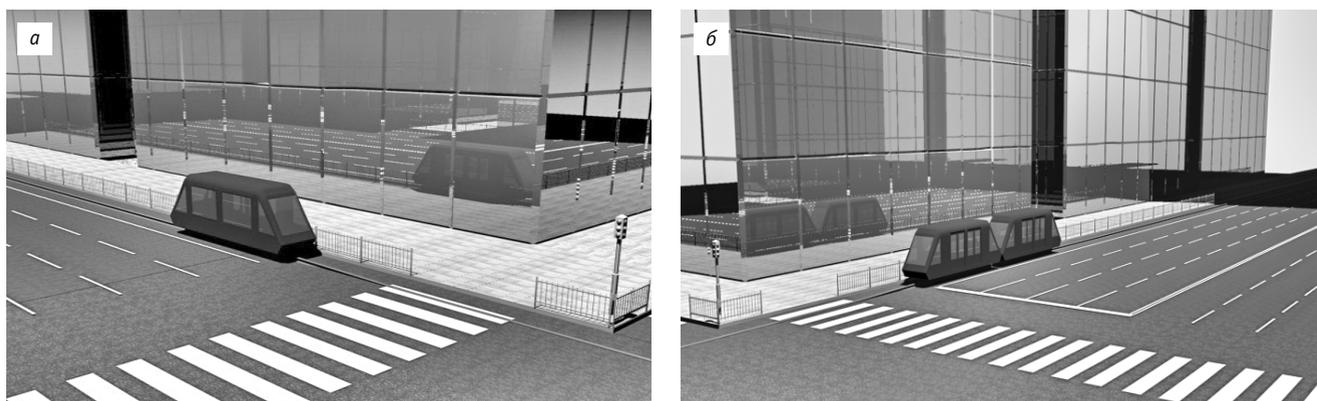


Рис. 1. Автопоезд из одного (а) и двух (б) инфобусов на перекрестке

Современная организация пассажироперевозок имеет следующие недостатки:

- отсутствие точной, объективной информации в режиме реального времени об интенсивности пассажиропотока;

- человеческий фактор в принятии ответственных решений по выбору объема транспортного средства.

Эффективным решением поставленных вопросов может быть только разработка и внедрение в городах автоматических транспортных систем на базе беспилотных транспортных средств (инфобусов). Элементы, составные части и устройство беспилотных транспортных средств уже основательно изучены и многократно испытаны во многих странах Европы, в США, России и Китае [4]. Остается открытым вопрос создания на их базе высокоэффективных городских транспортных систем нового типа, сочетающих в себе положительные качества личного и общественного транспорта. В настоящей работе предлагается способ построения таких систем.

НОВЫЙ СПОСОБ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК — КОНВЕЙЕРНО-КАССЕТНЫЙ НА БАЗЕ ИНФОБУСОВ

Инфобус — это беспилотный электрокар небольшой вместимости (до 30 пассажиров). При этом инфобусы собираются в кассеты (отсюда термин «кассетный тип транспорта»), состоящие из различного числа единиц. Соединение в кассетах виртуальное, как в автопоездах [5]. Минимальное безопасное расстояние

между инфобусами в кассете обеспечивает электроника. Кассетный способ организации перевозок пассажиров является таким же масштабным шагом вперед, каким в прошлом столетии был переход к контейнерному способу перевозки грузов.

Для более эффективной организации работы этой транспортной системы пассажир, проходя через турникет и оплачивая проезд, указывает также остановку, до которой ему необходимо ехать [6, 7]. Этим он обеспечивает себе безостановочный проезд до места назначения.

Полоса движения инфобусов непосредственно примыкает к тротуару и отделена от него ограждением, а от основной дороги слева — сплошной линией (рис. 1). Интенсивность использования дорожной инфраструктуры инфобусами, и в частности полосы движения, высокая. То есть намного выше, чем в классическом стандартном варианте выделенной дорожной полосы, так как перевозка равного числа пассажиров более узким транспортным средством требует большего их количества.

Второй ключевой момент данной транспортной системы — ее конвейерность. Как и в любом конвейере, движение инфобусов идет по узкой выделенной ленте улично-дорожной сети (УДС) без обгонов. Каждый предыдущий инфобус всегда является предыдущим, а последующий — последующим, и порядковая нумерация инфобусов остается постоянной. Движение транспортных средств осуществляется от накопителя 1 к накопителю 2, расположенных в конечных пунктах маршрута (рис. 2).

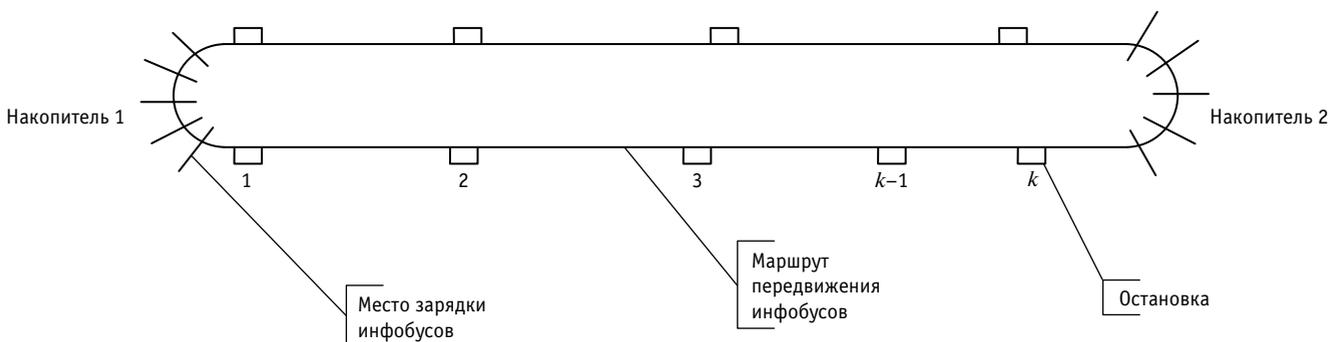


Рис. 2. Схема конвейерного движения инфобусов

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КОНВЕЙЕРНО-КАССЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Конвейерно-кассетная транспортная система перевозки включает в себя [8, 9]:

выделенный узкий участок УДС, примыкающий к тротуару и отгороженный с обеих сторон как от проезжей, так и от пешеходной части;

остановочные пункты посадки и высадки пассажиров, снабженные турникетами;

парк беспилотных транспортных средств (инфобусов) фиксированной небольшой емкости (до 30 пассажиров), связанных с координирующим сервером, команды которого отрабатываются транспортным средством.

Функционирование системы осуществляется следующим образом:

клиент (пассажир) на остановочном пункте во время оплаты через терминал указывает также и остановку, до которой желает ехать;

информация с терминалов поступает на координирующий сервер, формирующий матрицу корреспонденций ($M_Z, Z = 1, 2, \dots$), в которой фиксируется каждый прибывающий на остановку пассажир;

после некоторого временного промежутка и накопления в матрице корреспонденций ($M_Z, Z = 1, 2, \dots$) определенного числа пассажиров по ней формируется матрица развозок (план развозок), согласно которой инфобусы отправляются для развозки пассажиров по станциям назначения;

интервалы времени движения между остановками и время стоянки на остановках для данной системы известны.

Под планом перевозок (развозок) понимается процедура последовательного вывода инфобусов из накопителя 1 (см. рис. 2) на маршрутную линию с указанием конечной станции назначения, а также нескольких возможных промежуточных остановок для каждого нумерованного инфобуса индивидуально.

На информационном дисплее остановочного пункта перед приходом инфобуса высвечиваются адреса всех дальнейших остановок маршрута. Пассажиры, конечный пункт следования которых совпадает с предложенным набором остановок, занимают места в данном инфобусе. Остальные ждут своего инфобуса.

Таким образом, каждый инфобус, выходя с накопителя на маршрут, имеет индивидуальный порядковый номер и список станций, на которых ему необходимо сделать остановку для выгрузки и загрузки пассажиров. Основой разработки плана является текущая матрица корреспонденций ($M_Z, Z = 1, 2, \dots$). В соответствии с ней решается оптимизационная задача развозки и выдается план развозки.

В матрице корреспонденций ($M_Z, Z = 1, 2, \dots$) каждый элемент m_{ij} определяет число пассажиров, следующих с остановки i на остановку $j, i, j = 1, \dots, k$. Здесь k — число остановок одного направления маршрута (см. рис. 2). Очевидно, что элементы матрицы M_Z на главной диагонали и под главной диагональю равны нулю, так как предполагается, что пассажир не может выйти на остановке, на которой сел, и не может ехать назад:

$$M_Z = \begin{pmatrix} 0 & m_{12} & m_{13} & \dots & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1k} \\ 0 & 0 & m_{23} & \dots & \dots & m_{2j} & \dots & m_{2k} \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & m_{i+1} & \dots & m_{ij} & \dots & m_{ik} \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & m_{k-1k} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

При разработке плана развозок для текущей матрицы корреспонденций необходимо обеспечить бесконфликтность движения инфобусов на маршруте. План составляется для матрицы ($M_Z, Z = 1, 2, \dots$), каждый элемент которой меньше объема инфобуса V :

$$m_{ij} < V, \quad i = \overline{1, k-1}, \quad j = \overline{1, k}. \quad (1)$$

Процесс функционирования транспортной системы циклический и состоит из повторяющихся процедур. Это накопление информации в очередной матрице корреспонденций M_Z о прибывающих на остановочные пункты пассажирах, определение момента достаточного наполнения текущей матрицы корреспонденций ($M_Z, Z = 1, 2, \dots$), разработка плана развозки для данной фиксированной матрицы и выполнение этого плана. Считается, что план развозки для текущей матрицы ($M_Z, Z = 1, 2, \dots$) начинается в момент времени t_{0Z} и заканчивается в момент t_{kZ} , т.е. продолжительность развозки составляет $T_Z = t_{kZ} - t_{0Z}$. Причем время развозки $T_Z, Z = 1, 2, \dots$ не является фиксированным, а зависит от структуры данных в матрице M_Z .

Также принимается, что план, разработанный на начало развозки t_{0Z} , остается неизменным до ее окончания t_{kZ} вне зависимости от того, что в промежуток времени T_Z на остановочные пункты подходят новые пассажиры. Их развозка также должна быть обеспечена текущим планом. Для этого вводится коэффициент эластичности $a \in (0.8, 1)$. Тогда условие (1) требования к элементам текущей матрицы M_Z запишется следующим образом:

$$m_{ij} = a \cdot V, \quad a \in (0.8, 1), \quad i = \overline{1, k-1}, \quad j = \overline{1, k}. \quad (2)$$

Начало разработки плана развозок пассажиров наступает в момент, когда один из элементов матрицы M_Z начинает удовлетворять условию (2), и, следовательно, все элементы матрицы M_Z к началу развозки меньше объема инфобуса V , т.е. имеется запас, обеспечивающий возможность перевозки пассажиров, подошедших на остановку к моменту прибытия транспортного средства и не учтенных при формировании матрицы M_Z .

План развозок составляется для каждой строки $i = \overline{1, k-1}$ отдельно: сначала для первой строки матрицы M_Z , затем для второй и т.д. Выполнение плана развозок осуществляется в той же последовательности, т.е. транспортировка пассажиров начинается с первой остановки, затем со второй и т.д. Число пассажиров на первой остановке есть сумма элементов первой строки матрицы:

$$m_1 = \sum_{j=1}^k m_{1j} = \sum_{j=2}^k m_{1j}. \quad (3)$$

Для произвольной строки i число пассажиров на i -й остановке подсчитывается по формуле

$$m_i = \sum_{j=i+1}^k m_{ij}, \quad i = \overline{1, k-1}. \quad (4)$$

Тогда нижнюю границу необходимого количества транспортных средств для вывоза пассажиров с первой остановки на последующие можно оценить как ближайшее целое число, большее частного $\frac{m_{1j}}{V}$.

$$n_{1НГ} = \left\lceil \frac{m_{1j}}{V} \right\rceil. \quad (5)$$

Необходимое количество инфобусов, равное значению нижней границы $n_{1НГ}$, предполагает, что некоторые инфобусы загружены пассажирами нескольких соседних станций назначения. В этом случае пассажир добирается до места назначения с некоторым небольшим числом промежуточных остановок (в среднем не более двух).

Верхняя граница необходимого числа инфобусов для вывоза всех пассажиров с первой остановки равна $n_{1ВГ} = k - 1$, что иллюстрируется подграфом G_z развозок с первой остановки (рис. 3). Каждая дуга e_{1j} указывает одну безостановочную перевозку инфобусом пассажиров в количестве m_{1j} от остановки 1 до остановки j .

Такой случай наступает при условии, что для каждой пары элементов (m_{1j}, m_{1j+1}) , $j = \overline{2, k-1}$ первой строки выполняется условие

$$m_{1j} + m_{1j+1} > V, \quad j = \overline{2, k-1}, \quad (6)$$

т. е. в один инфобус не помещаются пассажиры, следующие на две соседние остановки (каждый инфобус загружен пассажирами только одной станции на-

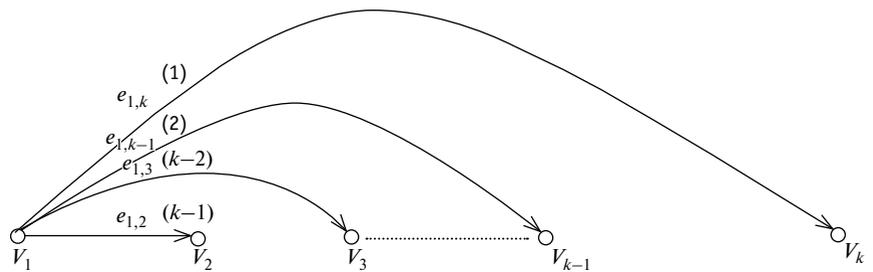


Рис. 3. Подграф развозки G_z вывоза пассажиров от первой остановки

значения, а каждый пассажир достигает своего пункта без остановок).

Более общее условие (6) — для любой пары групп из пассажиров, следующих от остановки 1 до остановки j и соответственно до остановки t :

$$m_{1j} + m_{1t} > V, \quad j, t = \overline{2, k}, \quad j \neq t. \quad (7)$$

То есть нельзя в один инфобус поместить две группы пассажиров, следующих на разные остановки j и t . Таким образом, пассажиры с остановки 1 доедут до своей конечной остановки $j(t)$ без промежуточных остановок.

Для любой i -й строки матрицы корреспонденций M_Z можно сразу указать нижнюю $n_{iНГ}$ и верхнюю $n_{iВГ}$ границы числа инфобусов, необходимого для перевозки с i -й остановки:

$$n_{iНГ} = \left\lceil \frac{m_i}{V} \right\rceil = \left\lceil \frac{\sum_{j=i+1}^k m_{ij}}{V} \right\rceil, \quad i = \overline{1, k-1}; \quad (8)$$

$$n_{iВГ} = k - i. \quad (9)$$

Нижняя $n_{iНГ}$ и верхняя $n_{iВГ}$ границы позволяют оценить необходимое число инфобусов для перевозки всех пассажиров матрицы корреспонденций M_Z для маршрута из k остановок:

$$N_{НГ} = \sum_{i=1}^{k-1} n_{iНГ}; \quad (10)$$

$$N_{ВГ} = \sum_{i=1}^{k-1} n_{iВГ}. \quad (11)$$

Нижняя $N_{НГ}$ и верхняя $N_{ВГ}$ границы необходимого числа инфобусов для развозки всех пассажиров по данным матрицы корреспонденций M_Z дают лишь оценочные значения параметров перевозки, но не отвечают на вопрос о том, как осуществить развозку пассажиров таким образом, чтобы транспортные средства не задерживали друг друга при движении и одновременно было бы использовано минимальное число инфобусов для перевозки по матрице $(M_Z, Z = 1, 2, \dots)$. Ответ на этот вопрос дает алгоритм построения плана развозки пассажиров на маршруте, который был разработан в последующих исследованиях данной транспортной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая система городского общественного транспорта, способная без помех со стороны других транспортных средств функционировать в насыщенной улично-дорожной среде и перевозить большое количество пассажиров, сравнимое с тем, что перевозит метрополитен.

Работа выполнена при поддержке европейского гранта «Grant Agreement Number 2013-4550/001-001» по проекту Be-Safe «Белорусская сеть безопасных дорог» совместно с университетом Сапиенца (Рим), Афинским политехническим университетом и университетом Лаффборо (Англия).

Литература

1. Вучик В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / Пер. с англ. А. Калинина ; под науч. ред. М. Блинкина. Москва : Территория будущего, 2011. 574 с.
2. Михайлов А. Ю., Головных И. М. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей. Новосибирск : Наука, 2004. 266 с.
3. Варелопупо Г. А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. Москва : Транспорт, 1981. 93 с.
4. Шуть В. Н., Персия Л. Интеллектуальные робототехнические транспортные системы. Брест : Изд-во БрГТУ, 2017. 195 с.
5. Проект Safe Road Trains for the Environment (SARTRE). URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Safe_Road_Trains_for_the_Environment (дата обращения: 02.10.2021).
6. Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Роботизированный городской транспорт кассетно-конвейерной перевозки пассажиров // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации : доклады XV Международной конференции. Минск, 2016. С. 86–91.
7. Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Высокопроизводительный вид городского пассажирского транспорта на базе современных информационных технологий // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. Воронеж : ВГЛУ, 2016. Т. 4. № 5. Ч. 3. С. 336–341.
8. Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Динамическая модель работы транспортной системы «ИНФОБУС» // Искусственный интеллект. Интеллектуальные транспортные системы : материалы научно-технической конференции. Брест : БрГТУ, 2016. С. 49–54.
9. Шуть В. Н., Пролиско Е. Е. Высокопроизводительная система городской транспортировки пассажиров // Електроніка та інформаційні технології : матеріали VIII українсько-польської научно-практичної конференції. Львів, 2016. С. 62–64.

References

1. Vuchic V. R. Transportation for livable cities [Transport v gorodakh, udobnykh dlya zhizni] / translated from the English by A. Kalinin ; under the scientific editorship of M. Blinkin. Moscow : Territory of the future, 2011. 574 p.
2. Mikhaylov A. Yu., Golovnykh I. M. Modern tendencies of design and reconstruction of road network [Sovremennye tendentsii proektirovaniya i rekonstruktsii ulichno-dorozhnykh setey]. Novosibirsk : Science, 2004. 266 p.
3. Varelopupo G. A. Organization of service on urban passenger transport [Organizatsiya dvizheniya i perevozok na gorodskom passazhirskom transporte]. Moscow : Transport, 1981. 93 p.
4. Shut' V. N., Persia L. Intelligent robot-technical transportation systems [Intellektual'nye robototekhnicheskie transportnye sistemy]. Brest : Publishing House of BrSTU, 2017. 195 p.
5. Safe Road Trains for the Environment (SARTRE) project [Proekt Safe Road Trains for the Environment (SARTRE)]. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Safe_Road_Trains_for_the_Environment (access date: 02.10.2021).
6. Prolisko E. E., Shut' V. N. Robotized urban transport of cassette-conveyor transportation of passengers [Robotizirovanny gorodskoy transport kassetno-konveyernoy perevozki passazhirov] // Development of informatization and state system of science and technology information : proceedings of the 15th International conference. Minsk, 2016. Pp. 86–91.
7. Prolisko E. E., Shut' V. N. Highly efficient type of urban passenger transport on the basis of modern information technologies [Vysokoproizvoditel'nyy vid gorodskogo passazhirskogo transporta na baze sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy] // Actual directions of scientific studies of the XXI century: theory and practice : proceedings of the International correspondence research and practice conference. Voronezh : VSUFT, 2016. Vol. 4. No. 5. Part 3. Pp. 336–341.
8. Prolisko E. E., Shut' V. N. Dynamic model of operation of the «INFOBUS» transportation system [Dinamicheskaya model' raboty transportnoy sistemy «INFOBUS»] // Artificial intelligence. Intelligent transportation systems : proceedings of the scientific and technical conference. Brest : BrSTU, 2016. Pp. 49–54.
9. Shut' V. N., Prolisko E. E. Highly efficient system of urban passenger transportation [Vysokoproizvoditel'naya sistema gorodskoy transportirovki passazhirov] // Electronics and information technologies : proceedings of the 8th Ukrainian-Polish research and practice conference. Lviv, 2016. Pp. 62–64.

Объем статьи 0,55 авторских листа

УДК 539.422.23

Алексей Вячеславович Якушев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ТЕОРИЯ О ДЕГРАДАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ СТАЛЕЙ КЛАССА 20Л

Alexey Vyacheslavovich Yakushev, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Theory on degradation of mechanical properties of 20L cast steel

Аннотация

Рассмотрены негативные изменения механических свойств и циклической вязкости разрушения сталей класса 20, применяемых для литых боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов, а также для нефтехимического оборудования, за 25–41 год эксплуатации. Основная причина охрупчивания стали обусловлена повышенным содержанием марганца и кремния в результате длительной циклической наработки.

Приведена опытная кинетическая кривая изменения циклической вязкости разрушения в зависимости от срока службы надрессорной балки тележки грузового вагона. Показаны модельные кривые деградации модуля упругости и деформации разрушения от относительной наработки в циклах.

На основе установленных эффектов сформулирована единая теория о деградации механических свойств литых сталей класса 20Л после циклической наработки для двух разделов механики — механики твердого тела и механики разрушения. Достоверность теории подтверждена опытными испытаниями.

Ключевые слова: механические свойства, модуль упругости, коэффициент поперечной деформации, циклическая вязкость разрушения, деградация, циклическая наработка.

Summary

The paper considers negative changes of mechanical properties and cyclic fracture toughness of 20L class steel that is used for cast solebars and bolsters of bogies for freight cars and also for petrochemical equipment for 25–41 years of operation. The main reason of embrittlement of steel is a high content of manganese and silicon as a result of long-term cyclic operating time.

The paper presents an experimental kinetic curve of change of cyclic fracture toughness depending on life of a bogie bolster of a freight car. The paper also shows model curves of degradation of an elasticity coefficient and fracture deformation depending on relative operating time in cycles.

On the basis of established effects the author has formulated an integrated theory on degradation of mechanical properties of 20L cast steel after the cyclic operating time for two chapters of mechanics — mechanics for rigid body and fracture mechanics. The reliability of the theory is confirmed by experimental tests.

Keywords: mechanical properties, coefficient of elasticity, Poisson's ratio, cyclic fracture toughness, degradation, cyclic operating time.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-8-14

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные теоретические и лабораторные исследования стандартных механических свойств литых сталей группы 20Л (20ГЛ, 20ФЛ, 20ГТЛ, 20ФТЛ, 20ФТЛ) [1–4], применяемых для производства несущих деталей тележек грузовых вагонов, и ковальной стали 20, используемой для нефтехимического оборудования [5], показывают, что после 25–41 года эксплуатации происходят изменения микроструктуры. Феррито-перлитная структура стали 20 остается таковой на протяжении длительной эксплуатации (рис. 1), но содержание марганца в феррите и кремния в перлите выходит за допустимые пределы, что приводит к охрупчиванию, которое выражается в увеличении прочности и одновременном снижении пластичности сталей.

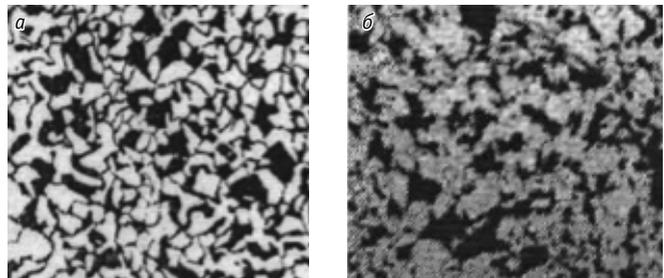


Рис. 1. Микроструктура стали 20 нефтехимического аппарата при увеличении $\times 50$: а — в состоянии поставки; б — после 41 года эксплуатации

Деградационные процессы сокращают запас сопротивления усталости и ускоряют развитие усталостной трещины при ее вероятном образовании в детали. Негативные изменения в стали наблюдаются по всем параметрам (табл. 1 [1]), в том числе по отношению временного сопротивления к условному пределу текучести $\sigma_B/\sigma_{0,2}$ от 2,0 до 1,2 за 25 лет эксплуатации. Первоначально циклически упрочняющиеся стали 20Л и 20ФЛ преобразуются в стабилизирующиеся, а затем, с ростом циклической наработки, — в разупрочняющиеся [6]. Поэтому классификация сталей по склонности к циклическому упрочнению или разупрочнению с помощью отношения $\sigma_B/\sigma_{0,2}$ справедлива до циклической наработки 0,30–0,35 N [4], где N — число циклов до разрушения по диаграмме Веллера.

Таблица 1

Механические свойства литых сталей для надрессорных балок тележек грузовых вагонов

Марка стали		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	K_{th} , МПа $\sqrt{м}$	K_{fc} , МПа $\sqrt{м}$
20Л	В состоянии поставки	220	455	22,0	35,0	8	147
	После 25 лет службы	345	425	6,5	20,0	5,3	57
20ГФЛ	В состоянии поставки	280	550	18,0	24,5	7,1	155
	После 13 лет службы	414	507	8,4	23,5	5,3	78

Примечание: $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести; σ_B — временное сопротивление; δ — относительное удлинение; ψ — относительное сужение; K_{th} — пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений; K_{fc} — циклическая вязкость разрушения.

Прогноз деградации циклической вязкости разрушения за 32 года эксплуатации надрессорной балки тележки (штриховая линия), построенный по усредненным данным табл. 1 для сталей класса 20Л, показан на рис. 2.

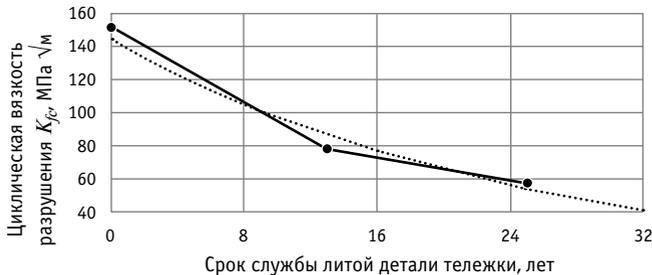


Рис. 2. Усредненная кинетическая кривая деградации циклической вязкости разрушения K_{fc} литых сталей класса 20Л

Эксперименты на нестандартных образцах при осевом растяжении стационарной нагрузкой и построение статической полной диаграммы деформирования (ПДД) показывают, что с увеличением относительной циклической наработки \bar{n} происходит постепенное вырождение модуля упругости E (рис. 3а) и деформации разрушения ε_p (рис. 3б), а результаты теорети-

ческого моделирования свидетельствуют также о снижении коэффициента поперечной деформации (КПД) ν сталей [4].

Однако, несмотря на имеющуюся деградацию указанных механических характеристик литых сталей, обновленные стандарты [7] по-прежнему ссылаются на упрощенные методы расчета усталостной прочности литых деталей тележек грузовых вагонов, основанные на линейной гипотезе суммирования повреждений (Пальмгрена — Майнера). Выводы о соответствии металла литых боковых рам, которые делаются при изучении причин разрушений на железных дорогах, строятся на сравнении с механическими свойствами новых сталей в состоянии поставки, без учета деградационных процессов, возникающих при эксплуатации.

В то же время, чтобы обеспечить выполнение установленных стандартом [8] требований надежности по недопущению перехода литых боковых рам и надрессорных балок в опасное состояние до очередного планового ремонта вагона, необходимы расчетные методики, способные прогнозировать стадию развития усталостной трещины. Поэтому создание математических моделей поврежденности литых сталей класса 20Л, основанных на теории о деградации механических свойств с помощью методов континуальной механики деформируемого твердого тела и механики разрушений, является актуальной задачей.

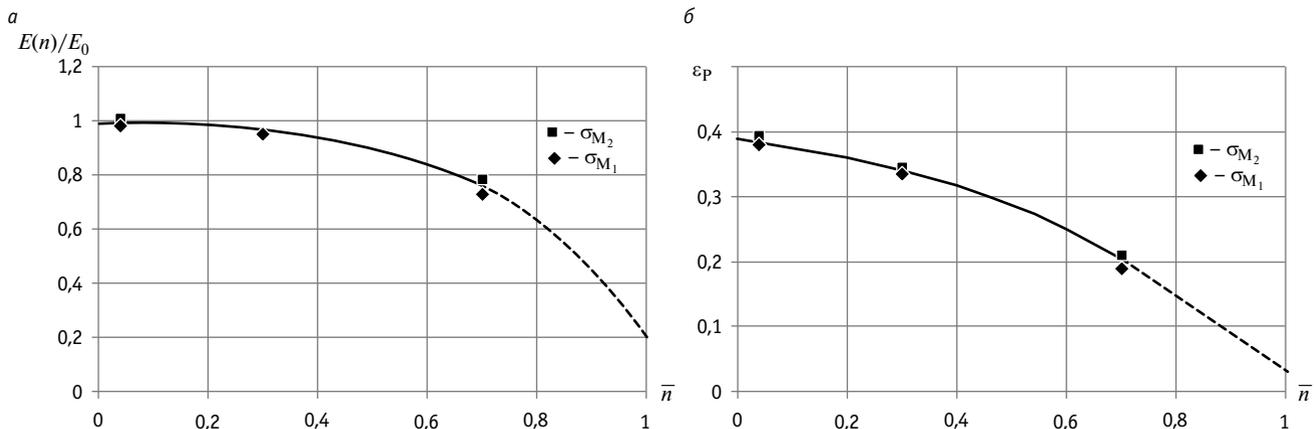


Рис. 3. Вырождение модуля упругости E (а) и деформации разрушения ε_p (б) для стали 20ГФЛ:

σ_{M1} — максимальные напряжения от нулевого цикла $0,6 \sigma_{0,2}$;
 σ_{M2} — максимальные напряжения от нулевого цикла $0,8 \sigma_{0,2}$; штриховая линия — прогноз

ФОРМУЛИРОВАНИЕ ТЕОРИИ

Единая теория о деградации механических свойств литых сталей после циклической наработки формулируется для двух направлений механики — континуальной механики и механики разрушений.

Континуальная механика, впервые предложенная Ю. Н. Работновым и Л. М. Качановым около 70 лет назад, основана на феноменологическом подходе при описании процессов образования и развития усталостных трещин, поврежденности металлов микродефектами. Неоднородность микроструктуры деформируемой области металла, микропоры, их преобразования, разрыхление перед разрушением рассматриваются как феномен, а поврежденность металла ω — как феноменологический усредненный показатель. Континуальная механика охватывает стадию разупрочнения металла, которая начинается за временным сопротивлением на диаграмме растяжения до зарождения трещины, а заканчивается после равновесного разделения образца на части. Это позволяет с физической точки зрения объяснить происхождение усталостных трещин после циклической наработки.

Линейная механика разрушений базируется на напряжениях вблизи вершины исходной трещины в области упругости. Основной показатель, описывающий напряженно-деформированное состояние (НДС) вблизи кончика трещины, — коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Более 100 лет назад А. Гриффитс связал поврежденность материалов ω с длиной исходной остроконечной трещины. Поэтому механика разрушений изучает только две стадии — развитие усталостной трещины и разрушение конструкции по трещине. Первоначальная трещина малой длины считается исходной, это может быть технологический дефект или эксплуатационная трещина в бездефектной зоне. Стадию зарождения исходной трещины в металле от воздействия переменных циклических нагрузок механика разрушений не рассматривает.

Отличительная особенность формулируемой теории о деградации механических свойств от классической механики разрушений состоит во введении кинетической кривой (см. рис. 2) для циклической вязкости разрушения K_{fc} (табл. 2). Уравнения деградации механических свойств в континуальной механике приведены в табл. 3.

Добавление в линейную механику разрушений стадии зарождения трещины после соблюдения первого из критериев (2) (см. табл. 2) в наиболее нагруженной локальной области конструкции не противоречит ее базовым принципам. Рост усталостной трещины в детали ограничивается значением $[K_{fc}]$ после 32 лет эксплуатации стали класса 20Л (см. рис. 2) путем последовательного выключения из расчетов конечных элементов (КЭ), в которых деградирующее значение $K_{fc}(\sigma_y, n)$ становится ниже $[K_{fc}]$. Статические значения КИН в вершине трещины повышаются с ее увеличением от порогового значения K_{fh} до циклической вязкости разрушения $[K_{fc}]$. Однако в разработанной теории о деградации механических свойств статический КИН не является управляющим параметром. Усталостное разрушение конечных элементов в твердотельной модели детали проводится после соблюдения одного из критериев (2) (см. табл. 2). Условием прочности в определении НДС детали служит временное сопротивление $S_B(\sigma_y, n)$ в конкретном КЭ, которое вырождается наряду с модулем упругости и КПД материала (см. табл. 3).

Уравнения деградации механических свойств в континуальной механике приведены в табл. 3.

Условием прочности в определении НДС детали служит временное сопротивление $S_B(\sigma_y, n)$ в конкретном КЭ, которое вырождается наряду с модулем упругости и КПД материала (см. табл. 3).

Таблица 2

Уравнения деградации циклической вязкости разрушения

Номер выражения	Название выражения, формула	Расшифровка условных обозначений формулы
1	Кинетическая кривая циклической вязкости разрушения: $K_{fc}(\sigma_y, n) = K_{fc}^0 - kn^m$	K_{fc}^0 — циклическая вязкость разрушения стали в состоянии поставки; k — коэффициент, определяемый из условия усталостного разрушения; σ_y — нормальные напряжения вдоль оси Y ; n — наработка в циклах
2	Условия усталостного разрушения: $K_{fc}(\sigma_y, N) \leq dK_{fc}^0$ $S_B(\sigma_M, N) \leq \sigma_M$ $E(\sigma_M, N) \leq \kappa E_0$ $\nu(\sigma_M, N) \leq \kappa \nu_0$	K_{fc} — текущее значение циклической вязкости разрушения стали после N циклов; d, κ — понижающие коэффициенты при условии $n = N$; S_B — текущее временное сопротивление; σ_M — максимальное напряжение цикла; E и ν — текущие значения модуля упругости и КПД; E_0 и ν_0 — модуль упругости и КПД в состоянии поставки стали
3	Условия эквивалентности двух состояний стали при смене уровня напряжений: $K_{fc}^1(\sigma_{y1}, n_1) = K_{fc}^2(\sigma_{y2}, n_2)$	—
4	Эквивалентное число циклов нагружений на втором уровне максимальных напряжений цикла: $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{K_{fc}^0 - K_{fc}^1}{K_{fc}^0(1-d)} \right)^{1/m}$	—

Таблица 3

Уравнения деградации механических свойств

Номер выражения	Название выражения, формула	Расшифровка условных обозначений формулы
1	<p>Кинетические кривые сопротивления усталости:</p> $S_B(\sigma_M, n) = S_{B_0} - k_\sigma n^\beta$ $\varepsilon_P(\sigma_M, n) = \varepsilon_{P_0} - k_\varepsilon n^m$ $E(\sigma_M, n) = E_0 - k_E n^\beta$ $\nu(\sigma_M, n) = \nu_0 - k_\nu n^\beta$	<p>S_{B_0} — временное сопротивление при разрыве для стали в состоянии поставки; ε_{P_0} — деформация разрушения стального образца в состоянии поставки; E_0 — модуль упругости стали в состоянии поставки; ν_0 — коэффициент поперечной деформации стали в состоянии поставки; m, β — эмпирические коэффициенты; $k_\sigma, k_\varepsilon, k_E, k_\nu$ — коэффициенты, определяемые из условий усталостного разрушения при стационарном нагружении; σ_M — максимальное напряжение цикла; n — наработка в циклах</p>
2	<p>Условия усталостного разрушения:</p> $S_B(\sigma_M, N) \leq \sigma_M$ $\varepsilon_P(\sigma_M, N) \leq \varepsilon_{PM}$ $E(\sigma_M, N) \leq \kappa E_0$ $\nu(\sigma_M, N) \leq \kappa \nu_0$	<p>$N = N_B$ — долговечность по диаграмме Веллера с учетом коэффициента асимметрии цикла; κ — понижающий коэффициент при условии $n = N$; ε_{PM} — деформация разрушения цикла с напряжением σ_M; $S_B, \varepsilon_P, E, \nu$ — текущие значения после наработки $n = N$</p>
3	<p>Условия эквивалентности двух состояний стали при смене уровня напряжений:</p> $S_B(\sigma_{M_1}, n_1) = S_B(\sigma_{M_2}, n_2)$ $\varepsilon_P(\sigma_{M_1}, n_1) = \varepsilon_P(\sigma_{M_2}, n_2)$ $\nu_1(\sigma_{M_1}, n_1) = \nu_2(\sigma_{M_2}, n_2)$ $E_1(\sigma_{M_1}, n_1) = E_2(\sigma_{M_2}, n_2)$	<p>σ_{M_1} и σ_{M_2} — максимальное напряжение цикла на первом и втором уровне нагружений соответственно; n_1 и n_2 — наработка в циклах при уровне напряжений σ_{M_1} и σ_{M_2} соответственно E_1, E_2, ν_1, ν_2 — текущие значения модулей на первом и втором уровнях нагружений</p>
4	<p>Эквивалентное число циклов нагружений на втором уровне максимальных напряжений цикла:</p> $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{S_{B_0} - S_3}{S_{B_0} - \sigma_{M_2}} \right)^{1/\beta}$ $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{\varepsilon_{P_0} - \varepsilon_{P_3}}{\varepsilon_{P_0} - \varepsilon_{PM_2}} \right)^{1/m}$ $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{E_0 - E_3}{E_0(1 - \kappa)} \right)^{1/\beta}$ $n_3 = n_2 = N_2 \left(\frac{\nu_0 - \nu_3}{\nu_0(1 - \kappa)} \right)^{1/\beta}$	<p>$S_3, \varepsilon_{P_3}, E_3, \nu_3$ — эквивалентные значения до перехода на следующий (второй) уровень S; ε_{PM_2} — деформация разрушения цикла с напряжением σ_{M_2}; N_2 — долговечность по диаграмме Веллера с учетом коэффициента асимметрии цикла и напряжения σ_{M_2}; m, β — эмпирические коэффициенты</p>

Уравнения табл. 2 и 3 обобщены на кинетическую кривую и условие эквивалентности поврежденности материала единого вида. Показатели степеней в уравнениях табл. 2 и 3 устанавливаются опытным путем в зависимости от интенсивности деградации параметра. Таким образом, формулы, приведенные в табл. 2 и 3, можно объединить в единую теорию о деградации механических свойств сталей группы 20Л для проведения расчетов усталостной прочности литых деталей тележек грузовых вагонов с учетом стадии зарождения и развития трещины.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ТЕОРИИ

В первом приближении отладка алгоритмов разработанной теории выполнена на пластине с отверстием в качестве концентратора напряжений при стационарном растяжении, которая может имитировать напряженное состояние вокруг технологического дефекта в стенке литой боковой рамы тележки. Симметрия пластины позволяет рассматривать ее часть (рис. 4) с отдельными телами по толщине (вставка на рис. 4) вдоль предполагаемой линии развития усталостной трещины и с персональными механическими свойствами E и ν .

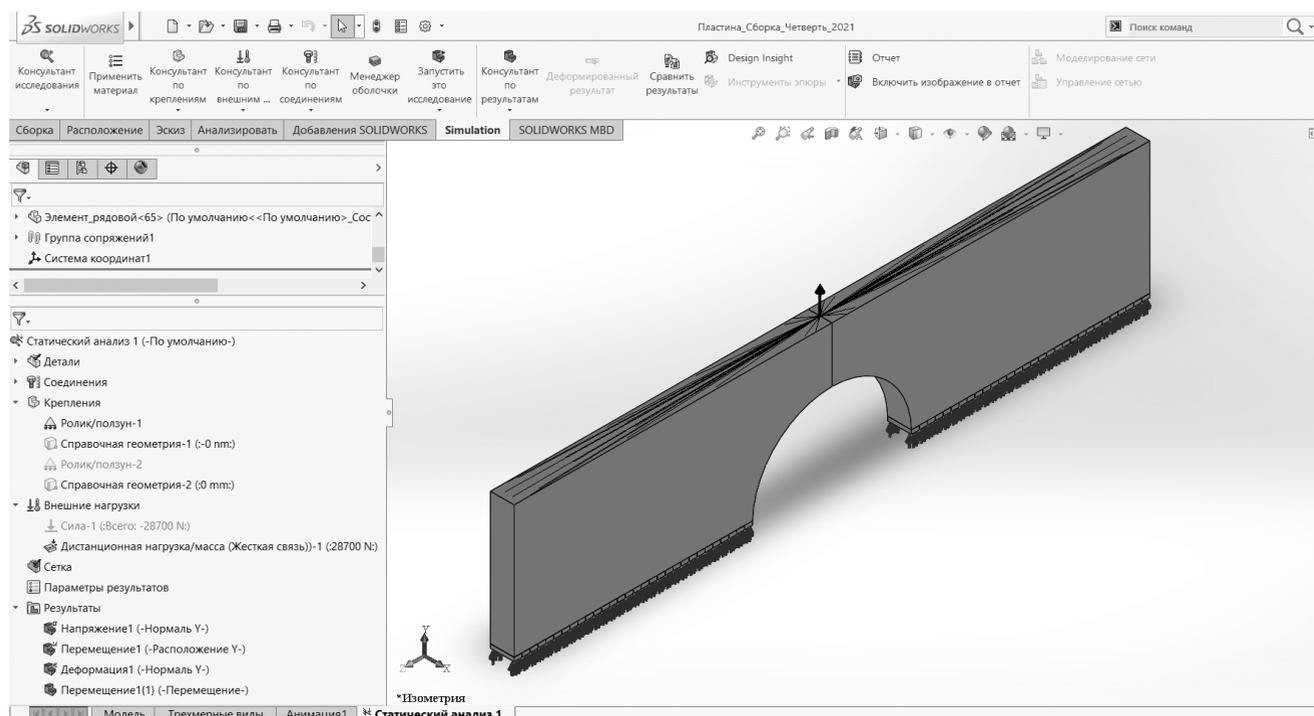


Рис. 4. Граничные условия для части пластины с отверстием

Исходные данные: литая сталь 20ГЛ; $E_0 = 2,1 \times 10^5$ МПа; $\nu_0 = 0,3$; $S_{B0} = 684$ МПа; предел текучести $\sigma_{T0} = 0,5 S_{B0} = 342$ МПа; расчетный предел выносливости $\sigma_r = 0,5 \sigma_{T0} = 171$ МПа; базовое число циклов $N_0 = 10^7$; максимальная нагрузка цикла $P_{\max} = 33100$ Н; максимальное напряжение цикла на краю отверстия $\sigma_{y1} = 301$ МПа; $\varepsilon_{p0} = 0,3884$; $K_{fc}^0 = 151$ МПа $\sqrt{м}$; $m = 0,6$ в табл. 2, $m = 1,4$ в табл. 3; $\beta = 1,9$; $\kappa = 0,2$; $d = 0,272$; угол наклона кривой усталости задан коэффициентом $\alpha = 4$. Размеры рабочей зоны пластины $80 \times 34 \times 3$ мм (длина \times высота \times толщина); диаметр отверстия 20 мм; площадь отверстия 314 мм².

Специальные программы для расчета усталостной прочности пластины, имеющей отверстие, разрабатывались на языке программирования VBA в программе MS Access с управлением по деформации разрушения ε_p (см. табл. 3) и по циклической вязкости разрушения K_{fc} (см. табл. 2). Авторские программы обменивались данными о текущих значениях σ_{yi} , E_i и ν_i в КЭ по фронту продвижения трещины с данными программы SolidWorks/Simulation для определения НДС пластины с отверстием. В результате таких обменов после некоторой циклической наработки деградация E_i и ν_i вызвала смену уровней максимальных напряжений цикла при неизменных граничных условиях, что в конечном счете приводило к росту числа циклов до разрушения КЭ на краю отверстия (рис. 5).

После соблюдения любого из критериев усталостного разрушения (см. табл. 2 и 3) конечному элементу задавались «единичные» значения E_i и ν_i , что означало рост длины трещины на его размер — 1 мм. Таким образом, число циклов до появления усталостной трещины с управлением по ε_p и с учетом деградации механических свойств составило $n_{TR} = 1452$ тыс., а до

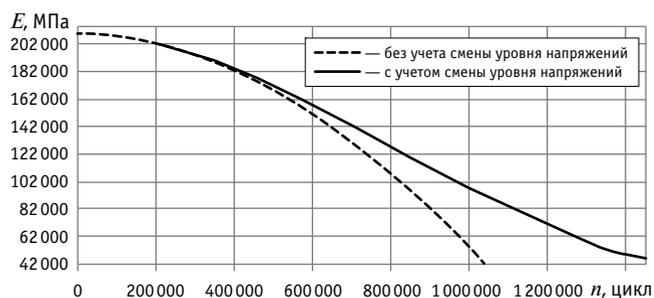


Рис. 5. Деградация модуля упругости в конечном элементе до его разрушения на краю отверстия

разрушения пластины $N_p = 2087$ тыс. (рис. 6, сплошная кривая). Если управление расчетом усталостной прочности осуществлять по параметру K_{fc} , то число циклов n_{TR} не изменится, а долговечность будет выше, т.е. $N_p = 2093$ тыс. циклов.

Прогноз по гипотезе Пальмгрена — Майнера

$$\omega_k = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

приводит к меньшим значениям: $n_{TR} = 1041,642$ и $N_p = 1795,845$ тыс. циклов (см. рис. 6).

Достоверность сделанных прогнозов проверялась в испытаниях на усталость двух натуральных пластин из стали 20ГЛ, вырезанных из надрессорной балки тележки в состоянии поставки. Граничные условия в испытательной машине ZWICK/ROELL Amsler HB250 приближены к расчетным. Усталостные трещины в одной из пластин (рис. 7) совпали по направле-

нию с расчетными представлениями. Несимметричное их развитие относительно отверстия наблюдалось и в расчетах. В изломе пластины имеются неметаллические включения диаметром 0,5 мм (см. рис. 7), которые способствовали ускоренному прорастанию трещины. Вторая пластина имела в изломе большие размеры литейных дефектов, поэтому результаты ее испытаний признаны некорректными. Стоит отметить, что вырезанные образцы малых поперечных сечений из натуральных отливок в 30–40% случаев отбраковываются по причине технологических дефектов.

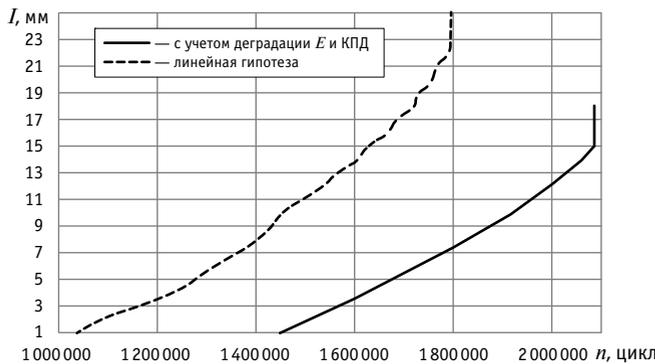


Рис. 6. Развитие усталостной трещины в пластине с отверстием при стационарном нагружении

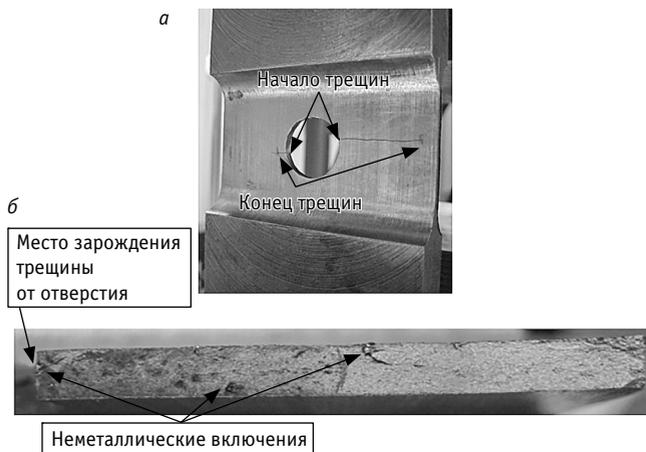


Рис. 7. Пластина с отверстием после испытаний на усталость при стационарном нагружении растягивающей нагрузкой: а — усталостные трещины от отверстия; б — излом

В лабораторных испытаниях пластин получено число циклов до зарождения усталостной трещины длиной 1 мм от отверстия, равное $n_{TR} = 1480,16$ тыс., что на 2% выше прогнозных значений теории о деградации механических свойств и на 40% по сравнению с гипотезой Пальмгрена — Майнера. Количество циклов до разрушения пластины признано некорректным из-за наличия внутренних технологических дефектов в ее поперечном сечении.

Уменьшение интервала циклической наработки в выражениях табл. 2 и 3 при определении текущих значений E и ν в конечном элементе на краю отверстия и увеличение количества

переходов с одного уровня максимальных напряжений цикла на другой приведет к тому, что число циклов до разрушения КЭ увеличится и еще более приблизится к опытным данным. Разрушение КЭ на краю отверстия пластины связано с зарождением усталостной трещины.

Выражение Пальмгрена — Майнера (1) ожидаемо снижает данные о зарождении усталостной трещины, что коррелирует с результатами прогноза срока службы литой боковой рамы, сделанного в работе [9]. Согласно [9], литая боковая рама тележки грузового вагона не должна эксплуатироваться более двух лет. На практике срок службы боковой рамы составляет 32 года, причем 90% деталей выдерживают этот период использования.

Предполагается, что прогнозы усталостной долговечности надрессорных балок и боковых рам тележек, сделанные по алгоритмам разработанной теории о деградации механических свойств, будут также корректными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированная единая теория о деградации механических свойств литых сталей класса 20Л для прогнозирования усталостной долговечности несущих деталей тележек грузовых вагонов позволяет прийти к следующим выводам и рекомендациям.

1. В механику разрушения добавляется раздел по изучению процесса образования микрповреждений с первых циклов циклической наработки материала до возникновения макротрещины в элементе конструкции. Накопление повреждений в нагруженных областях продолжается с развитием трещины перед ее фронтом, что способствует росту трещины. В предложенной теории эмпирическое значение порогового значения K_{fh} заменяется критерием поврежденности материала $K_{fc}(\sigma_y, N)$, зависящим от количества циклов нагружения материала.

2. Наряду с вновь введенным критерием поврежденности материала $K_{fc}(\sigma_y, N)$ отслеживается деградация модуля упругости E , коэффициента поперечной деформации ν и временного сопротивления S_B в нагруженных областях, что приводит к увеличению значений усталостной долговечности при прогнозах.

3. Механические свойства материала, которые деградируют с первых циклов наработки, а также циклическая вязкость разрушения обобщены единой кинетической кривой с разными показателями степени в зависимости от интенсивности необратимых процессов, единым условием эквивалентности двух состояний материала при смене уровней напряжений, а также критериями разрушений. Функционирование установленной системы механических свойств сведено в единую теорию о деградации.

4. Достоверность предложенной теории 98%, гипотезы Пальмгрена — Майнера 60%, что установлено при натуральных испытаниях на усталость пластин с отверстием.

5. Разработанная теория о деградации механических свойств литых сталей класса 20Л оснащена рабочими алгоритмами, авторским программным обеспечением с пользовательским интерфейсом на языке программирования VBA для приложения Windows/MS Access и рекомендуется для инженерного применения при проектировании боковых рам и надрессорных балок.

Литература

1. Северинова Т. П. Исследование трещиностойкости сталей литых деталей тележек грузовых вагонов после длительного периода эксплуатации // Вестник ВНИИЖТ. 1999. № 3. С. 35–40. ISSN 2223–9731.
2. Змеева В. Н., Лебединский С. Г. Вероятностное прогнозирование длительности развития усталостных трещин в литых сталях деталей грузовых вагонов // Вестник ВНИИЖТ. 2000. № 2. С. 44–47. ISSN 2223–9731.
3. Змеева В. Н., Лебединский С. Г. Статистические закономерности развития усталостных трещин в литых сталях деталей грузовых вагонов // Вестник ВНИИЖТ. 1999. № 3. С. 26–31. ISSN 2223–9731.
4. Якушев А. В., Мионов В. И., Рузметов Я. О. Прогнозирование усталостного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов : монография. Ташкент : Complex Print, 2021. 136 с.
5. Кириллова Н. Ю. Оценка остаточного ресурса длительно эксплуатируемого реакционного оборудования из углеродистой стали с учетом охрупчивания : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфа, 2006. 150 с.
6. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. Москва : МИСиС, 1998. 400 с.
7. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва : Стандартинформ, 2016. 54 с.
8. ГОСТ 32400–2013. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия (с поправкой, с изменением № 1). Москва : Стандартинформ, 2014. 57 с.
9. К вопросу оценки ресурса и безопасной эксплуатации конструкций подвижного состава / Н. А. Махутов, В. С. Коссов, Э. С. Оганьян [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 11. С. 43–47. ISSN 1028–6861.

Объем статьи 0,76 авторских листа

References

1. Severinova T. P. Study of crack resistance of steel for cast elements of bogies of freight cars after long period of operation [Issledovanie treshhinostoykosti staley litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov posle dlitel'nogo perioda ekspluatatsii] // VNIIZhT Scientific Journal. 1999. No. 3. Pp. 35–40. ISSN 2223–9731.
2. Zmeeva V. N., Lebedinskiy S. G. Probabilistic forecasting of duration of endurance cracks development in cast steel of parts of freight cars [Veroyatnostnoe prognozirovanie dlitel'nosti razvitiya ustalostnykh treshhin v litykh stalyakh detaley gruzovykh vagonov] // VNIIZhT Scientific Journal. 2000. No. 2. Pp. 44–47. ISSN 2223–9731.
3. Zmeeva V. N., Lebedinskiy S. G. Statistical dependencies of endurance cracks development in cast steel of parts of freight cars [Statisticheskie zakonomernosti razvitiya ustalostnykh treshhin v litykh stalyakh detaley gruzovykh vagonov] // VNIIZhT Scientific Journal. 1999. No. 3. Pp. 26–31. ISSN 2223–9731.
4. Yakushev A. V., Mironov V. I., Ruzmetov Ya. O. Forecasting of fatigue life for cast elements of bogies for freight cars [Prognozirovanie ustalostnogo resursa litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov] : monograph. Tashkent : Complex Print, 2021. 136 p.
5. Kirillova N. Yu. Assessment of residual life of reaction equipment made of carbon steel with the consideration of embrittlement and long-term operation [Otsenka ostatochnogo resursa dlitel'no ekspluatiruемого reaktivnogo oborudovaniya iz uglerodisty stali s uchetoм okhrupchivaniya] : PhD in Engineering Thesis. Ufa, 2006. 150 p.
6. Zolotarevskiy V. S. Mechanical properties of metals [Mekhanicheskie svoystva metallov]. Moscow : MISIS, 1998. 400 p.
7. GOST 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities [Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2016. 54 p.
8. GOST 32400–2013. Molded side frame and bolster beam of bogies for railway freight wagons. Specifications (with an amendment, with a change No. 1) [Rama bokovaya i balka nadressornaya litye telezhek zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya (s popravkoy, s izmeneniem № 1). Moscow : Standardinform, 2014. 57 p.
9. To a question of assessment of life and safe operation of rolling stock parts [K voprosu otsenki resursa i bezopasnoy ekspluatatsii konstruktsiy podvizhnogo sostava] / N. A. Makhutov, V. S. Kossov, E. S. Ogan'yan [et al.] // Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2007. Vol. 73. No. 11. Pp. 43–47. ISSN 1028–6861.

УДК 629.463.32:656.085.5

**Дмитрий Вячеславович Зяблов, 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,**

**Александр Вячеславович Зяблов, аспирант кафедры «Нетяговый подвижной состав»
Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия**

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОБОЛОЧКИ КОТЛА НЕФТЕБЕНЗИНОВОЙ ЦИСТЕРНЫ ПРИ ПОЖАРЕ

**Dmitiy Vyacheslavovich Zyablov, postgraduate student, Railway Cars and Carriage Facilities Department,
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,**

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

**Alexander Vyacheslavovich Zyablov, postgraduate student, Non-tractive Rolling Stock Department,
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia**

Modeling of non-steady thermal field of shell for oil and gasoline tank at fire

Аннотация

Аварийные режимы, возникающие при воздействии открытого пламени на котел нефтебензиновой цистерны, приводят к температурным напряжениям, которые могут вызвать разрушение оболочки котла, снизить жесткость и прочность его материала. В статье рассмотрена методика определения нестационарного температурного поля оболочки котла в очаге пламени, получено уравнение теплопроводности в частных производных, предложена новая аппроксимация температурного поля в виде полиномов. Методика реализована в программном комплексе MathCad и может быть использована при проектировании железнодорожных цистерн для перевозки опасных грузов и при разработке систем защиты от аварийных тепловых воздействий.

Ключевые слова: вагон-цистерна, оболочка котла, аварийный режим, пожар, температурное поле, уравнение теплопроводности, вариационный метод.

Summary

Emergency states that arise at influence of free fire on an oil and gasoline tank shell lead to thermal stress that can cause shell damage, a decrease of hardness and material strength. The paper considers a method for determination of a non-steady thermal field of the shell in a fire centre. Besides, the authors have got a thermal conductivity equation in partial derivatives and suggest a new approximation of the thermal field in the form of polynomials. The method is realized in the MathCad program complex and can be used at design of railway tanks for transportation of dangerous freights and at development of systems for protection from emergency thermal influences.

Keywords: tank-car, shell, emergency state, fire, thermal field, thermal conductivity equation, variational method.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-15-18

ВВЕДЕНИЕ

Аварийные ситуации, связанные с воздействием открытого пламени на котел нефтебензиновой цистерны, представляют значительную опасность, так как неравномерное температурное поле становится причиной появления температурных напряжений, непосредственно приводящих к возможному разрушению оболочки. Кроме того, повышение температуры вызывает ослабление механических характеристик материала котла, что оказывает дополнительное влияние на восприятие нагрузок. При этом снижается и жесткость (модуль упругости), и прочность материала (в том числе пределы прочности и текучести).

Задача настоящего исследования заключается в задании методики определения температурного поля котла. При разработке методики использованы известные теплотехнические подходы, связанные с составлением уравнения теплопроводности в частных производных и применением вариационного метода, а также предложена новая аппроксимация температурного поля, что позволило получить решение в явном виде.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим цилиндрическую оболочку вокруг горловины как наиболее вероятную зону возгорания пролитого продукта.

В качестве расчетной схемы примем дважды симметричную прямоугольную область с цилиндрической системой координат $Oxuz$, связанную со срединной поверхностью оболочки, в которой ось Ox направлена по верхней образующей, криволинейная ось Oy — по направляющей, пересекающей ось горловины, ось Oz — по радиусу. Внешнее воздействие выберем в виде прямоугольного очага пламени с заданной температурой. В связи с симметрией рассмотрим четверть оболочки, полагая отсутствие осевой теплопроводности через плоскости симметрии.

Расчет строим при следующих допущениях.

1. Температуры на наружной и внутренней поверхностях оболочки в каждой точке поверхности совпадают. Это допущение основано на результатах исследований других авторов.
2. Внешнее тепловое воздействие в очаге пламени задается значением температуры пламени.
3. Вне очага температура окружающей среды принимается равной температуре воздуха до начала пожара.
4. Температура внутри котла задается постоянной.
5. Начальная температура принимается равной температуре воздуха до начала пожара.
6. Толщина, длина и ширина оболочки полагаются постоянными и не зависящими от температуры.
7. Температурное поле оболочки не зависит от ее напряженного состояния.
8. На наружной и внутренней поверхностях оболочки происходит теплоотдача по закону Ньютона.
9. Удельная теплоемкость, удельная теплопроводность, коэффициенты теплоотдачи и плотность материала котла принимаются постоянными в процессе нагрева.
10. На границах исследуемой области принимается затухание осевой теплопроводности. Это условие и определяет размеры оболочки исходя из результатов предыдущих исследований [1].

Запишем уравнение теплопроводности для принятой расчетной схемы. Для этого рассмотрим малый прямоугольный элемент оболочки и все тепловые потоки, которые на него воздействуют (рис. 1).

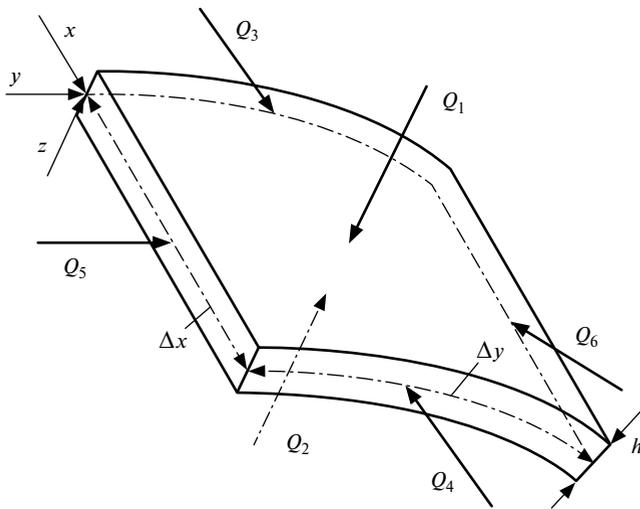


Рис. 1. Тепловые потоки, воздействующие на малый элемент

Энергия нагрева элемента за малый промежуток времени равна сумме всех воздействующих на него тепловых потоков:

$$cm\Delta T = \sum_{i=1}^6 Q_i \Delta t, \quad (1)$$

где c — удельная теплоемкость материала, Дж/кг·К;

$m = \rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot h$ — масса элемента, кг, где h и ρ — толщина, м, и плотность, кг/м³;

ΔT — изменение температуры элемента за малый промежуток времени, К;

T — температура элемента, °С;

Q_i — i -й тепловой поток к элементу, Вт;

Δt — промежуток времени, с;

t — время, с.

При этом:

$$Q_1 = \alpha_H(T_H - T)\Delta x \Delta y; \quad Q_2 = -\alpha_B(T - T_B)\Delta x \Delta y; \quad (2)$$

$$Q_3 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x h \Delta y; \quad Q_4 = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} h \Delta y; \quad (3)$$

$$Q_5 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_y h \Delta x; \quad Q_6 = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y+\Delta y} h \Delta x, \quad (4)$$

где Q_1 и Q_2 — тепловые потоки (теплоотдача) на наружной и внутренней поверхностях оболочки соответственно;

Q_3 и Q_4 — тепловые потоки (осевая теплопроводность) вдоль оси Ox ;

Q_5 и Q_6 — тепловые потоки (осевая теплопроводность) вдоль оси Oy ;

α_H, α_B — коэффициенты теплоотдачи соответственно на наружной и внутренней поверхностях;

T_H, T_B — температуры среды снаружи и внутри котла соответственно;

λ — удельная теплопроводность.

Подставим тепловые потоки (2)–(4) в уравнение (1):

$$\begin{aligned} c\rho\Delta x\Delta y h(T|_{t+\Delta t} - T|_t) = & [\alpha_H(T_H - T)\Delta x\Delta y + \\ & + \alpha_B(T_B - T)\Delta x\Delta y + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} h\Delta y - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x h\Delta y + \\ & + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y+\Delta y} h\Delta x - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_y h\Delta x] \Delta t, \end{aligned} \quad (5)$$

поделим его на $h\Delta x\Delta y\Delta t$ и возьмем пределы при $\Delta t \rightarrow 0$; $\Delta x \rightarrow 0$; $\Delta y \rightarrow 0$, что приведет к уравнению теплопроводности в частных производных, описывающему процесс распространения тепла в оболочке под воздействием очага пожара:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha_H}{h}(T_H - T) + \frac{\alpha_B}{h}(T_B - T) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (6)$$

Физический смысл уравнения теплопроводности (6) состоит в том, что скорость нагрева оболочки пропорциональна суммарному притоку энергии. При этом приток энергии происходит от очага пламени через наружную поверхность, а отток тепла: а) через наружную поверхность вне очага пламени в окружающую атмосферу; б) через внутреннюю поверхность к грузу (жидкой или газообразной фазе); в) к менее нагретым областям оболочки через осевую теплопроводность.



Начальные условия зададим в виде равномерного температурного поля по всей оболочке:

$$t = 0; T = T_0, \quad (7)$$

где T_0 — температура воздуха.

Граничные условия выражают отсутствие осевой теплопроводности на границах исследуемой области и через плоскости симметрии, проходящие через центр очага пламени:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a} = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b}, \quad (8)$$

где a — длина половины исследуемой области вдоль оси Ox ; b — длина дуги половины исследуемой области по оси Oy .

Уравнение теплопроводности в частных производных (6) преобразуем в обыкновенное дифференциальное уравнение по времени, применив вариационный метод и аппроксимацию.

Составим функционал, соответствующий уравнению (6) [2]:

$$J = \int_0^b \int_0^a \left[\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} T + \frac{\alpha_H + \alpha_B}{2h} T^2 - \frac{\alpha_H T_H + \alpha_B T_B}{h} T + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dy dx. \quad (9)$$

Введем аппроксимацию температурного поля следующего вида:

$$T(x, y) = T_{ц} \left(\frac{2x^3}{a^3} - \frac{3x^2}{a^2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{2y^3}{b^3} - \frac{3y^2}{b^2} + 1 \right), \quad (10)$$

где $T_{ц}$ — температура в центре очага пламени, т.е. при $x = 0$, $y = 0$.

Подставив функцию формы (10) в выражение для функционала (9), приходим к выражению

$$J = M \frac{\partial T_{ц}}{\partial t} T_{ц} + \frac{1}{2} R T_{ц}^2 - P T_{ц}, \quad (11)$$

где

$$M = \int_0^b \int_0^a \rho c_p \left(\frac{2x^3}{a^3} - \frac{3x^2}{a^2} + 1 \right)^2 \cdot \left(\frac{2y^3}{b^3} - \frac{3y^2}{b^2} + 1 \right)^2 dy dx;$$

$$R = \int_0^b \int_0^a \left[\frac{\alpha_H + \alpha_B}{h} \left(\frac{2x^3}{a^3} - \frac{3x^2}{a^2} + 1 \right)^2 \cdot \left(\frac{2y^3}{b^3} - \frac{3y^2}{b^2} + 1 \right)^2 + \lambda \left(\frac{6x^2}{a^3} - \frac{6x}{a^2} \right)^2 \cdot \left(\frac{2y^3}{b^3} - \frac{3y^2}{b^2} + 1 \right)^2 + \lambda \left(\frac{2x^3}{a^3} - \frac{3x^2}{a^2} + 1 \right)^2 \cdot \left(\frac{6y^2}{b^3} - \frac{6y}{b^2} \right)^2 \right] dy dx;$$

$$P = - \int_0^b \int_0^a \frac{\alpha_H T_H + \alpha_B T_B}{h} dy dx.$$

Следует учитывать, что температура T_H наружной среды различна для различных точек оболочки.

Условие стационарности функционала (11) имеет вид

$$\frac{dJ}{dT_{ц}} = 0,$$

что окончательно приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению относительно температуры центра очага пламени

$$M \frac{\partial T_{ц}}{\partial t} + R T_{ц} = P. \quad (12)$$

С точки зрения оценки прочности котла интерес представляет главным образом установившийся температурный режим. Через определенное время после начала нагрева температура практически перестает повышаться, и все подводимое от очага пламени тепло передается в конечном счете в окружающую атмосферу.

Тогда температуру оболочки в центре очага пламени можно определить по формуле

$$T_{ц} = \frac{P}{R}. \quad (13)$$

При исследовании нестационарного процесса с постоянными теплофизическими характеристиками линейное неоднородное дифференциальное уравнение (12) решается в виде

$$T_{ц} = C_1 e^{-Bt} + C_2, \quad (14)$$

где C_1, B, C_2 — неопределенные коэффициенты, которые находятся путем подстановки решения (14) в уравнение (12) и начального условия (7).

Окончательно имеем

$$T_{ц} = \frac{P}{R} - \left(\frac{P}{R} - T_0 \right) e^{-Bt}. \quad (15)$$

Из этого решения можно получить решение (13) для установившегося режима, если взять его предел при $t \rightarrow \infty$.

При учете зависимости теплофизических параметров материала от температуры можно применить метод численного интегрирования. В работах [1, 3–6] хорошо зарекомендовал себя неявный метод Адамса второго порядка. Возможно также использование метода Эйлера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И РАССУЖДЕНИЯ

С помощью предложенной методики, реализованной в программном комплексе MathCad, выполнены исследования нестационарного температурного поля котла цистерны модели 15–740, имеющей внутренний диаметр 3000 мм и используемой для перевозки светлых нефтепродуктов.

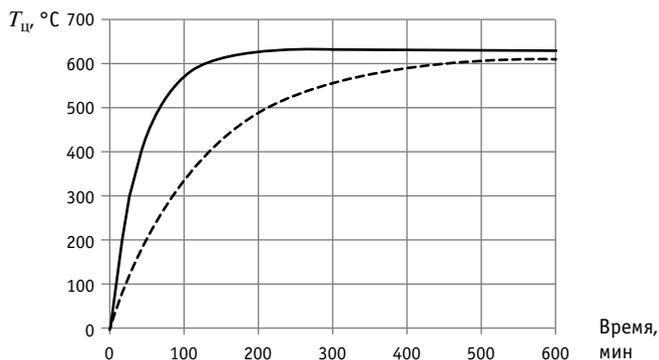


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры оболочки в очаге пламени от времени

На рис. 2 представлены зависимости максимальной температуры оболочки в очаге пламени от времени. Сплошная линия соответствует коэффициенту теплоотдачи на наружной поверхности $\alpha_H = 15 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, а штриховая линия — коэффициенту $\alpha_H = 5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

На рис. 3 и 4 показаны результаты массовых расчетов с варьированием температурой и размером очага пламени.

Как следует из полученных данных, при снижении коэффициента теплоотдачи в три раза уровень максимальных температур снижается менее чем на 3%. При этом процесс повышения температуры существенно замедляется. Время появления установившегося режима увеличивается примерно в три раза, что позволяет обеспечить огневую защиту за счет создания наружного слоя, снижающего теплоотдачу на поверхности.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения нестационарного температурного поля оболочки котла нефтебензиновой цистерны в очаге пламени.

2. Получены в явном виде формулы для определения температуры оболочки в очаге пламени для случаев установившегося режима и постоянных теплофизических параметров.

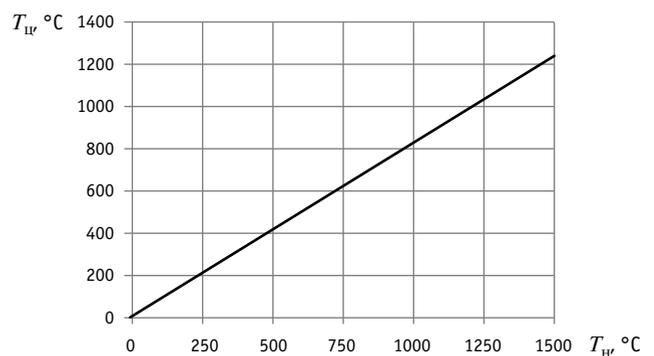


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры оболочки от температуры очага пламени

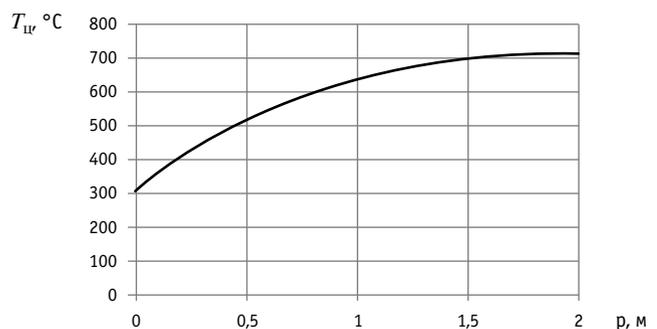


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры оболочки от размера очага пламени

3. Предложенная методика реализована в программном комплексе MathCad и может использоваться организациями, занимающимися проектированием железнодорожных цистерн для перевозки опасных грузов и разработкой систем защиты от аварийных тепловых воздействий.

4. Результаты исследования показали эффективность системы огневой защиты котла цистерны путем создания слоя, снижающего теплоотдачу на наружной поверхности.

Литература

1. Беспалько С. В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2000. 47 с.
2. Михлин С. Г. Курс математической физики. Москва : Наука, 1968. 576 с.
3. Нестационарные температурные поля в замкнутых оболочках вращения : отчет / руководитель А. М. Макаров ; отв. исполнитель Романовский М. Р. Балашиха, 1979. 33 с. Инв. № 3056.
4. Агупова Т. А. Исследование нестационарных температурных полей в элементах криогенных резервуаров в режиме заполнения их криопродуктом : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1990. 18 с.
5. Афонина В. П. Исследование нестационарных температурных полей в однопоточных теплообменных аппаратах криогенной техники : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1993. 22 с.
6. Головин В. В. Моделирование поведения котла цистерны в очаге пламени : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2005. 22 с.

References

1. Bepalko S. V. Development and analysis of models of damaging influence on shells of tanks for cryogen transportation [Razrabotka i analiz modeley povrezhdayushihkh vozdeystviy na kotly tsistern dlya perevozki kriogennykh produktov] : Synopsis of DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2000. 47 p.
2. Mikhlin S. G. Mathematical physics course [Kurs matematicheskoy fiziki]. Moscow : Science, 1968. 576 p.
3. Nonstationary thermal fields in closed shells of rotation [Nestatsionarnye temperaturnyye polya v zamknutykh obolochkakh vrasheniya] : report / Manager Makarov A. M.; responsible executor Romanovskiy M. R. Balashikha, 1979. 33 p. No. 3056.
4. Agupova T. A. Study of non-steady thermal fields in elements of cryogen reservoirs in mode of filling by cryogen [Issledovanie nestatsionarnykh temperaturnykh poley v elementakh kriogennykh rezervuarov v rezhime zapolneniya ikh krioproductom] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 1990. 18 p.
5. Afonina V. P. Study of non-steady thermal fields in single-flow heat-exchange cryogen equipment [Issledovanie nestatsionarnykh temperaturnykh poley v odnopotochnykh teploobmennykh apparatakh kriogennykh tekhniki] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 1993. 22 p.
6. Golovin V. V. Modeling of tank shell behaviour in fire centre [Modelirovanie povedeniya kotla tsisterny v ochage plameni] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2005. 22 p.

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 ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

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

Sergey Valeryevich Bepalko, 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 detection and analysis of fire risk of passenger car wiring by thermal radiation

Аннотация

В статье рассматриваются возможности защиты электрооборудования пассажирских вагонов на основе волоконно-оптических датчиков, позволяющих по тепловому излучению инфракрасного диапазона из мест повреждения проводов обнаруживать и контролировать пожароопасные состояния электрических сетей. Важным требованием для электрических сетей пассажирских вагонов является непрерывность контроля по всей длине проводов, включая труднодоступные места внутри объектов сети. Датчик, отвечающий этому требованию, может быть выполнен в виде оптического волокна, вплетенного в многопроволочную жилу провода, на выходном конце которого размещены фотоприемник и устройство обработки фотоэлектрического сигнала.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, тепловое излучение, инфракрасный диапазон, спектральный канал, интегральный канал, брэгговская решетка, оптический циркулятор.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-19-23

Summary

The paper considers possibilities of protection of passenger car electric equipment on the basis of fiber-optic sensors that allow detecting and controlling fire risk conditions of wiring by thermal radiation of the infrared band from wiring fault locations. Continuous control along the length of wires including hardly accessible places inside wiring is an important requirement for passenger car wiring. It is possible to design a sensor that satisfies this requirement in the shape of optical fiber woven in a multistranded wire with a photodetector and a device for processing photoresponse on the output lead.

Keywords: fiber-optic sensor, thermal radiation, infrared band, spectral channel, integrated channel, Bragg grating, optical circulator.

Оптическое волокно осуществляет съем теплового излучения по всей длине токопроводящей жилы и его доставку на фотоприемник [1]. Зона чувствительности датчика протяженная и распределена по длине провода. Если температура токопроводящей жилы в местах повреждений проводов поднимается, то мощность теплового излучения повышается, а его спектр смещается в коротковолновую область, что потенциально можно использовать для формирования признаков обнаружения повреждений и оценки пожароопасных состояний электропроводки [2, 3].

При прохождении тока выделяемое в проводах тепло рассеивается вдоль жилы и через слой изоляции — в окружающее пространство. Если повреждения отсутствуют, то устанавливается некоторое относительно равномерное распределение температуры вдоль токопроводящей жилы. В рабочем режиме значение температуры обычно составляет до 60–80 °С в зависимости от величины протекающего тока и температуры окружающей среды [4, 5], а спектр собственного теплового излучения токопроводящей жилы находится в инфракрасном диапазоне с максимумом вблизи длины волны 10 мкм.

Возникающее по каким-либо причинам повреждение проводов сначала носит локальный характер и не вызывает немедленного возгорания. Проводящий канал, образовавшийся в окружающей жилу изоляции, постепенно все более обугливается и под действием токов утечки разрастается. В какой-то момент в этом «угольном мостике» возникает тлеющий разряд, а через некоторое время — электрическая дуга, которая может привести к возгоранию. Обнаружение повреждений проводов на ранних стадиях, предшествующих электрической дуге, позволит заблаговременно выявлять пожароопасные состояния электропроводки пассажирского вагона и снижать риск возникновения пожаров [6].

Для раннего выявления повреждений температуру электропроводки можно контролировать с помощью инфракрасных пирометров или тепловизоров [7–9], что, однако, требует оптической доступности контролируемых участков электрических сетей. Предлагаемый волоконно-оптический датчик не требует такой доступности и пригоден для непрерывного контроля за состоянием электрических проводов в труднодоступных местах внутри конструкций пассажирских вагонов.

Пусть вдоль жилы провода имеется распределение температуры $T(x)$, где x — продольная координата, $0 \leq x \leq L_0$. Токопроводящая жила будет считаться тонкой (поперечные размеры много меньше длины L_0), а распределение температуры в ее сечении однородным.

Элементарная площадка поверхности dS , находящаяся при температуре T , создает тепловое излучение со спектральной плотностью мощности

$$dP(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)F(\lambda, T)dS, \quad (1)$$

где λ — длина волны, м;

T — температура по шкале Кельвина, связанная с температурой t по шкале Цельсия соотношением $T = 273,16 + t$;

$\varepsilon(\lambda, T)$ — спектральная степень черноты материала проводника;

$F(\lambda, T)$ — спектральная светимость абсолютно черного тела, Вт/м³.

Составной множитель $\varepsilon(\lambda, T)F(\lambda, T)$ в выражении (1) — спектральная светимость материала (обычно алюминия или меди) токопроводящей жилы.

Спектральная светимость абсолютно черного тела $F(\lambda, T)$ определяется следующим образом [10, 11]:

$$F(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(-\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1}, \quad (2)$$

где h — постоянная Планка, Дж·с;

c — скорость света, м/с;

k — постоянная Больцмана, Дж/К.

Спектральная степень черноты $\varepsilon(\lambda, T)$ для металлов имеет значения примерно от 0,1 до 0,3 и обычно возрастает с увеличением температуры и уменьшением длины волны [11].

Мощность теплового излучения, попадающего на фотоприемник в спектральном диапазоне $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$, равна

$$P = \chi b \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \int_0^{L_0} F[\lambda, T(x)] \varepsilon[\lambda, T(x)] dx d\lambda, \quad (3)$$

где χ — безразмерный коэффициент связи, характеризующий долю излучения жилы, попадающего на фотоприемник;

b — коэффициент с размерностью длины, по смыслу соответствующий поперечному размеру области контакта жилы с оптическим волокном.

Найдем значение повышения полной мощности теплового излучения, попадающего на фотоприемник, при появлении локального повреждения провода. Для этого в выражении (3) необходимо выполнить интегрирование по всем длинам волн при заданных распределениях температур $T(x)$ и спектральной степени черноты $\varepsilon(\lambda, T)$. Однако из-за отсутствия полных данных о поведении $\varepsilon(\lambda, T)$ для материалов токопроводящих жил в требуемых диапазонах длин волн и температуры используем приближенную оценку на основе формулы для светимости абсолютно черного тела $F(T) = \sigma T^4$ (здесь σ — постоянная Стефана — Больцмана) [10, 11].

Пусть при отсутствии повреждения в рабочем режиме устанавливается равномерное распределение температуры $T(x) = T_0$, где T_0 зависит от величины протекающего тока и температуры окружающей среды. Распределение температуры $T(x)$ в случае локального повреждения опишем моделью $T(x) = T > T_0$ при $L < x < L + \Delta L$ и $T(x) = T_0$ при остальных x (здесь L — координата начала участка с повышенной температурой T , ΔL — его длина). Предположим, что спектральная степень черноты материала $\varepsilon(\lambda, T)$ токопроводящей жилы слабо зависит от длины волны и температуры. Тогда полная мощность теплового излучения провода без повреждения и при его наличии составит $P_0 = \chi b \varepsilon \sigma T_0^4 L_0$ и $P = \chi b \varepsilon \sigma [T_0^4 (L_0 - \Delta L) + T^4 \Delta L]$ соответственно, а относительное увеличение

$$v = \frac{P}{P_0} = 1 + \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^4 - 1 \right] \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (4) относительное увеличение полной мощности теплового излучения провода с типичной длиной $L_0 = 10$ м, имеющего рабочую температуру $t_0 = 25$ °С, при длине участка $\Delta L \leq 5$ см, нагретого до температуры $t = 200\text{--}250$ °С, составит не более 1–5 %. Обнаружить такое небольшое увеличение полной мощности теплового излучения, обусловленное повреждением провода, достаточно сложная задача. Поэтому для обнаружения повреждений предпочтительнее использовать изменения мощности теплового излучения в коротковолновой части спектра.

На рис. 1 представлено относительное изменение спектральной светимости абсолютно черного тела [см. формулу (2)]. Видно, что наиболее существенно она возрастает в коротковолновой части спектра в диапазоне 1–5 мкм.

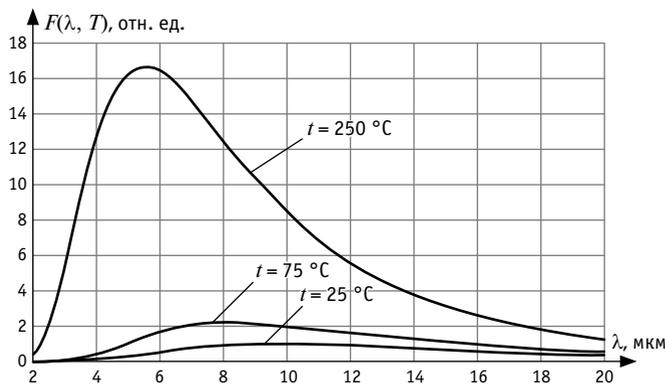


Рис. 1. Относительное изменение спектральной светимости абсолютно черного тела при изменении температуры от 25 до 250 °С

Пусть тепловое излучение, собранное оптоволокном, регистрируется в двух спектральных каналах в диапазонах длин волн $(\lambda_1, \lambda_1 + \Delta\lambda_1)$ и $(\lambda_2, \lambda_2 + \Delta\lambda_2)$.

Исходя из выражения (3) отношение мощностей излучения в спектральных каналах составит

$$\mu = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda_2} \int_0^{L_0} F[\lambda, T(x)] \varepsilon[\lambda, T(x)] dx d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta\lambda_1} \int_0^{L_0} F[\lambda, T(x)] \varepsilon[\lambda, T(x)] dx d\lambda}. \quad (5)$$

Пусть ширины спектральных каналов $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ относительно невелики, и в их пределах зависимостями спектральных светимости $F(\lambda, T)$ и степени черноты $\varepsilon(\lambda, T)$ от длины волны λ можно пренебречь. На основе данных [11] примем, что в рассматриваемом диапазоне температур спектральная степень черноты слабо зависит от температуры и $\varepsilon(\lambda, T) \approx \varepsilon(\lambda, T_0)$. Тогда выражение (5) примет вид

$$\mu = \frac{\varepsilon(\lambda_2, T_0) \Delta\lambda_2 \int_0^{L_0} F[\lambda_2, T(x)] dx}{\varepsilon(\lambda_1, T_0) \Delta\lambda_1 \int_0^{L_0} F[\lambda_1, T(x)] dx}. \quad (6)$$

Для случая одиночного локального повреждения примем следующую модель распределения температуры по проводу длиной L_0 . Пусть в рабочем режиме температура токопрово-

дящей жилы провода одинакова вдоль ее длины и равна T_0 . Локальное повреждение будем рассматривать как «горячую» точку с тепловыделением, обусловленным током утечки. Температура T_m в точке повреждения максимальна и падает из-за рассеивания тепла вдоль провода по мере удаления от нее на характерной длине спада температуры $\Delta L \ll L_0$. Значение температуры T_m может рассматриваться как показатель пожарной опасности повреждения провода. При однородности условий рассеивания мощности, выделяемой в точке повреждения, для установившегося стационарного теплового режима можно приближенно считать, что зависимость температуры жилы от координаты x имеет экспоненциальный вид

$$T(x) = T_0 + \Delta T_m \exp\left(\frac{-|x - L|}{\Delta L}\right), \quad (7)$$

где $\Delta T_m = T_m - T_0$ — максимальное превышение температуры в области повреждения над рабочей температурой токопроводящей жилы.

В модели (7) предполагается, что точка повреждения находится достаточно далеко от концов провода $L \gg \Delta L, L_0 - L \gg \Delta L$, и краевые эффекты при распределении теплового потока можно не учитывать.

Диапазоны длин волн спектральных каналов следует выбрать таким образом, чтобы по изменению величины μ можно было обнаружить появление «горячего» участка провода вблизи места повреждения.

На рис. 2 представлены результаты численных расчетов по выражению (6) зависимости μ от максимальной температуры в месте повреждения провода t_m (°С) = T_m (°К) – 273,16 для значений характерной длины $\Delta L = 1, 2, 4$ см при рабочих температурах $t_0 = 25$ °С (сплошные линии) и 75 °С (пунктирные линии) для спектральных каналов $\lambda_1 = 5$ мкм, $\Delta\lambda_1 = 0,01$ мкм, $\lambda_2 = 2,5$ мкм, $\Delta\lambda_2 = 0,2$ мкм и предположении, что $\varepsilon(\lambda_1, T_0) \approx \varepsilon(\lambda_2, T_0)$. Диапазон рассматриваемых температур t_m выбран исходя из температуры воспламенения типичных электротехнических материалов, которая, например, составляет 350–500 °С для полихлорвинила, полиэтилена, полистирола, текстолита, резины [12, 13].

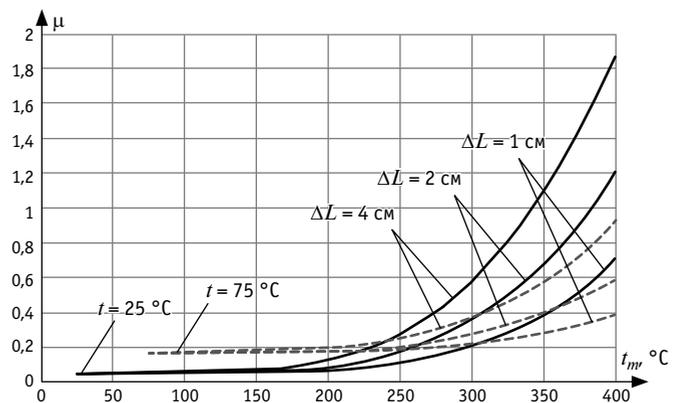


Рис. 2. Зависимости отношения мощностей теплового излучения в спектральных каналах датчика от максимальной температуры на участке повреждения провода

Выбранные выше для расчетов значения параметров имеют ориентировочный характер и в дальнейшем должны уточняться на основе более совершенных моделей свойств материалов, условий эксплуатации электросетей, развития повреждений электропроводов и процессов возгорания, а также оптимизации параметров датчика с учетом особенностей его технической реализации.

Зависимости, представленные на рис. 2, подтверждают возможность обнаружить локальные повреждения электропроводки по изменениям в коротковолновой части спектра теплового излучения, собираемого оптическим волокном, при температуре в точке повреждения от 200–250 °С и выше. Алгоритм обнаружения заключается в выработке порога $\mu_{\text{пор}}(t_0)$, зависящего от текущего значения рабочей температуры провода, и в сравнении измеренного значения μ с порогом.

Спектральные каналы распределенного волоконно-оптического датчика можно реализовать на основе волоконных брэгговских решеток [14], представляющих собой участки оптического волокна, в которых сформировано периодическое пространственное изменение показателя преломления. Принципиальная структурная схема предлагаемого датчика представлена на рис. 3 (слой изоляции вокруг токопроводящей жилы и оптического волокна на рис. 3 не обозначен).

Оптическое волокно датчика встроено в контролируемый провод вдоль всей его длины. Собранный тепловой излуче-

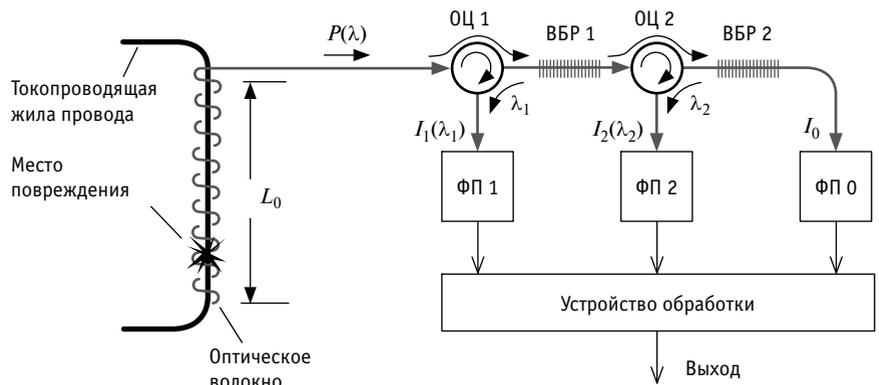


Рис. 3. Принципиальная структурная схема распределенного волоконно-спектрального датчика с интегральным I_0 и двумя спектральными каналами $I_1(\lambda_1)$, $I_2(\lambda_2)$

ние со спектральной плотностью мощности $P(\lambda)$ направляется на оптические циркуляторы 1, 2 (ОЦ 1, ОЦ 2) и отрезки оптического волокна со сформированными внутри них волоконными брэгговскими решетками 1, 2 (ВБР 1, ВБР 2). ВБР являются спектрально-селективными отражательными фильтрами, что требует применения оптических циркуляторов для вывода оптического излучения спектральных каналов. Электрические сигналы интегрального и двух спектральных каналов формируются фотоприемниками ФП 0, ФП 1, ФП 2. Устройство обработки производит обнаружение поврежденных проводов и оценку показателей пожароопасного состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обнаружения пожароопасных состояний электрических сетей пассажирских вагонов рекомендуется использовать ме-

тод, основанный на тепловом излучении инфракрасного диапазона. При реализации этого метода предлагается применять оптическое устройство, в состав которого включены три фотоприемника, два оптических циркулятора и оптическое волокно с двумя брэгговскими решетками. Для обнаружения теплового излучения используется трехканальная схема с двумя спектральными каналами и одним интегральным. С целью проверки работоспособности предложенного устройства разработаны модели обнаружения тепловой энергии и получены результаты, подтверждающие их работоспособность. Предложенный вариант оптического устройства рекомендуется применять совместно с оптическим волокном в электрических сетях пассажирских вагонов при решении задач раннего прогнозирования возникновения возгораний [1, 15–20].

Литература

1. Модель обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов в электрических сетях пассажирских вагонов на основе применения волоконно-оптических датчиков / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, И. А. Ключиков [и др.] // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 46–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-46-51. ISSN 1815-9400.
2. Сметанина М. И., Власова О. С. Состояние пожарной безопасности на железнодорожном транспорте в Российской Федерации // Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования: сборник статей по материалам LII международной студенческой научно-практической конференции. 2018. № 17 (52). С. 85–89.
3. Оценка возможностей современных технических средств оповещения о пожарах в помещениях пассажирских вагонов подвижного состава / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис,

References

1. 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 [Model' obnaruzheniya i otsenki požaroopasnosti iskrovyykh razryadov v elektricheskikh setyakh passazhirskikh vagonov na osnove primeneniya volokonno-opticheskikh datchikov] / V. A. Khanis, S. V. Bepalko, I. A. Klyuchikov [et al.] // Transport of the Urals. 2021. No. 3 (70). Pp. 46–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-46-51. ISSN 1815-9400.
2. Smetanina M. I., Vlasova O. S. Condition of fire safety on railway transport in the Russian Federation [Sostoyaniye požarnoy 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.
3. Assessment of possibilities of modern technical facilities for fire warning in salons of passenger cars [Otsenka vozmozhnostey sovremennykh tekhnicheskikh sredstv opovesheniya o požarakh v pomesheniyakh passazhirskikh vagonov podvizhnogo sostava] / V. A. Khanis, S. V. Bepalko,

- А. А. Ханис // Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология : сборник трудов II международной научно-практической конференции. Якутск, 2020. С. 177–181.
4. Ковригин Л. А. Основы кабельной техники. Пермь : Изд-во ПГТУ, 2006. 94 с.
 5. Листратенков А. И. Теоретические основы конструирования силовых кабелей и проводов. Москва : Полиграф сервис, 2006. 292 с.
 6. 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.
 7. Бажанов С. А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации. Ч. 1. Москва : НТФ «Энергопрогресс», 2005. 80 с.
 8. Бажанов С. А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации. Ч. 1. Москва : НТФ «Энергопрогресс», 2005. 64 с.
 9. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Москва : Спектр, 2009. 544 с.
 10. Ландсберг Г. С. Оптика. Москва : Физматлит, 2003. 848 с.
 11. Таблицы физических величин : справочник / Под. ред. И. К. Киикоина. Москва : Атомиздат, 1976. 1008 с.
 12. Орловский С. Н. Теория горения и взрыва техники. Красноярск : Изд-во КГАУ, 2006. 318 с.
 13. Иванов Е. А. Электрооборудование как источник пожара // Новости электротехники. 2001. № 6 (12).
 14. Варжель С. В. Волоконные брегговские решетки. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2015. 65 с.
 15. 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. Курск : ЮЗГУ, 2020. Т. 4.
 16. Важов В. Ф., Лавринович В. А. Техника высоких напряжений. Томск : Изд-во ТПУ, 2014. 263 с.
 17. 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.
 18. Совмещенный датчик электрической дуги / Ю. П. Казачков : патент 2419941 Российская Федерация. № 2010123334/07 ; заявл. 08.06.2010 ; опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15.
 19. 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.
 20. 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.
 - 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.
 4. Kovrigin L. A. Basics of cable engineering [Osnovy kabel'noy tekhniki]. Perm : Publishing House of PSTU, 2006. 94 p.
 5. Listratenkov A. I. Theoretical basics of design of power cables and wires [Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya silovyykh kabeley i provodov]. Moscow : Polygraph service, 2006. 292 p.
 6. 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 pozharoопасnykh sostoyaniy elektrooborudovaniya passazhirsikh 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.
 7. Bazhanov S. A. Heat monitoring of electric equipment in operation [Teplovizionnyy kontrol' elektrooborudovaniya v ekspluatatsii]. Part 1. Moscow : Energoprogress, 2005. 80 p.
 8. Bazhanov S. A. Heat monitoring of electric equipment in operation [Teplovizionnyy kontrol' elektrooborudovaniya v ekspluatatsii]. Part 1. Moscow : Energoprogress, 2005. 64 p.
 9. Vavilov V. P. Infrared thermography and heat monitoring [Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol']. Moscow : Spectrum, 2009. 544 p.
 10. Landsberg G. S. Optics [Optika]. Moscow : Physics and mathematics literature, 2003. 848 p.
 11. Tables of physical quantities [Tablitsy fizicheskikh velichin] : handbook / Ed. by I. K. Kikooin. Moscow : Atomizdat, 1976. 1008 p.
 12. Orlovskiy S. N. Theory of combustion and explosion of equipment [Teoriya goreniya i vzyrya tekhniki]. Krasnoyarsk : Publishing House of KSAU, 2006. 318 p.
 13. Ivanov E. A. Electric equipment as a source of fire [Elektrooborudovanie kak istochnik pozhara] // Electrical Engineering News. 2001. No. 6 (12).
 14. Varzhel S. V. Fiber Bragg grating [Volokonnye breggovskie reshetki]. St. Petersburg : ITMO University, 2015. 65 p.
 15. Models for diagnosing fire-hazardous states of power supply networks of a passenger car [Modeli diagnostiki pozharoопасnykh sostoyaniy setey elektrosnabzheniya passazhirsikogo 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. Kursk : SWSU, 2020. Vol. 4.
 16. Vazhov V. F., Lavrinovich V. A. High-voltage equipment [Tekhnika vysokikh napryazheniy]. Tomsk : Publishing House of TPU, 2014. 263 p.
 17. Belenkov A., Shvechikov I., Eliseev A. Optical systems for detecting electrical ark in complete distribution devices [Opticheskie sistemy obnaryzheniya elektricheskoy dugi v komplektnykh raspredelitel'nykh ustroystvakh] // Components and technologies. 2016. No. 3 (176). Pp. 16–20. ISSN 2079–6811.
 18. Combined sensor of electrical ark [Sovmeshhennyy datchik elektricheskoy dugi] / Yu. P. Kazachkov : patent 2419941 Russian Federation. No. 2010123334/07 ; filed 08.06.2010 ; publ. 27.05.2011, Bulletin No. 15.
 19. Kopeykina T. V. Application of optical sensors for systems of ark protection of complete distribution systems [Primenenie opticheskikh datchikov dlya sistem dugovoy zashchity komplektnykh raspredelitel'nykh sistem] // Modern methods of technical diagnostics and nondestructive inspection of parts and assemblies. 2020. No. 4.
 20. Diagnostics and early prevention of fire-hazardous conditions in passenger cars [Diagnostika i rannee preduprezhdenie pozharoопасnykh sostoyaniy v vagonakh passazhirsikogo 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.

Объем статьи 0,4 авторских листа

УДК 656.222

Ольга Павловна Югрин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,

Лариса Сергеевна Жарикова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛИГОНА С ПОРОЖНИМ ВАГОНПОТОКОМ

Olga Pavlovna Yugrina, PhD in Engineering, Associate Professor, Track Maintenance Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,

Larisa Sergeevna Zharikova, PhD in Engineering, Associate Professor, Track Maintenance Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Features of operation of railway polygon with empty car traffic

Аннотация

В статье рассмотрены варианты различных технологий перевозочного процесса, направленные на минимизацию эксплуатационных затрат и учитывающие взаимные интересы перевозчика и грузоотправителей. При внедрении таких технологических мер, как концентрация вагонопотоков на станциях с достаточными техническими возможностями и обеспечение минимального числа переработок в пути следования с разделением вагонов по принадлежности операторам, использованы метод исследования операций грузовых перевозок и математическое моделирование перевозочного процесса. В результате разработан алгоритм принятия решений по организации эксплуатационной работы при учете загрузки инфраструктуры в каждые расчетные сутки.

Ключевые слова: приватный парк вагонов, план формирования поездов, железнодорожное направление, организация вагонопотоков, железнодорожный полигон.

Summary

The paper considers variants of different technologies of transportation process that are directed on minimization of operating costs and that consider mutual interests of a carrier and consignors of goods. At introduction of such technological measures as concentration of car traffic at stations with sufficient technical possibilities and provision of a minimal number of yard operations in transit with separation of cars by belonging to operators the authors have applied the operations research method and mathematical modeling of transportation process. As a result, the authors have developed a decision making algorithm on organization of operation with the consideration for loading of infrastructure in every design day.

Keywords: unofficial car fleet, plan for making-up of trains, railway direction, car traffic organization, railway polygon.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-24-29

Оптимизация грузовых перевозок и необходимость рационального использования железнодорожной инфраструктуры актуализируют задачу по организации перемещения вагонопотоков, особенно порожних вагонов, с наименьшими эксплуатационными затратами.

В настоящее время железнодорожный транспорт осуществляет перевозочную деятельность, используя приватный вагонный парк, что полностью меняет технологию работы с порожними вагонами после выгрузки. В «Инструктивных указаниях по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО „РЖД“» от 29.12.2018 г. определено несколько способов перевозки порожних вагонов. Тем не менее, использование приватного парка в любом случае увеличивает порожние пробеги, что оказывает негативное влияние на загрузку элементов железнодорожной инфраструктуры, а также приводит к необходимости наращивания вагонного парка собственниками подвижного состава. Сегодня планирование порожних рейсов в плановом и оперативном режиме осуществляется по-разному. Как следствие, увеличивается загрузка инфраструктуры и меняется порядок взаимодействия между перевозчиком и владельцем подвижного состава. Однако действенных мер по оптимизации данного процесса пока не принято.

В сложившейся ситуации для рационального использования инфраструктуры целесообразно сочетать планирование эксплуатационной работы и диспетчерское управление. При этом в планировании должен преобладать метод балансового расчета, а в диспетчерском управлении — адресная привязка вагонных ресурсов к заявкам на перевозку. Для этого при разработке технических норм эксплуатационной работы устанавливаются корреспонденции порожних вагонов исходя из регулировочного разрыва. То есть число вагонов, подводится в регион погрузки, при месячном планировании определяется разницей между погрузкой и выгрузкой. При оперативном управлении это число рассчитывается как разность между нормативным и фактическим наличием порожних вагонов.

С одной стороны, такой способ позволяет сокращать порожний пробег подвижного состава, а с другой — в условиях использования частных вагонов, принадлежащих разным владельцам, применять его весьма затруднительно.

За рубежом железные дороги ведут острую конкурентную борьбу за клиентов с другими видами транспорта. Это обязывает работать по установленной технологии с максимальным соблюдением интересов грузовладельцев и минимизацией вагоно-часов простоя на станциях, но в то же время приводит к дополнительным затратам по содержанию локомотивного парка и увеличению резерва в загрузке инфраструктуры. Кроме того, возникают проблемы с дополнительным простоем вагонов, что приводит к излишней загрузке путей станции и невыполнению обязательств по своевременной перевозке.

Таким образом, актуальность исследования данной проблемы заключается в повышении конкурентоспособности железных дорог за счет минимизации расходов перевозчика и владельцев вагонного парка, что можно реализовать на основе формирования регламента работы с порожними вагонами в новых условиях и, как следствие, снижения загрузки инфраструктуры. Предметом исследования являются принципы организации перевозки порожних частных вагонов с учетом технологии грузовых перевозок и эксплуатационных расходов железнодорожного транспорта. Цель настоящего исследования состоит в рассмотрении вариантов использования различных технологий перевозочного процесса, включая выделение отдельных элементов грузовых перевозок, а также учет не только минимизации эксплуатационных затрат, но и взаимных интересов перевозчика и грузоотправителей [1].

Известно, что полезная работа транспорта при грузовых перевозках — это процесс перемещения грузов в вагонах. Технология этого процесса, называемая планом формирования грузовых поездов, позволяет обеспечить рациональное использование существующей инфраструктуры. Поэтому технические нормы, разрабатываемые на основе заявок грузоотправителей и в соответствии с планом формирования, будут наиболее целесообразны. Данные об объемах и направлениях следования груженых вагонопотоков определяются по заявкам грузоотправителей. На основе разработанной «шахматки» груженых вагонопотоков выполняется расчет технических норм эксплуатационной работы, определяющий затраты по всем составляющим планируемых грузовых перевозок. Последовательность применения отдельных компонентов технологического процесса (технических операций с вагонами в период следования от станции погрузки до станции выгрузки и обратно в порожнем состоянии) при организации грузовых перевозок в соответствии с планом формирования поездов на сети железных дорог зависит от принадлежности вагонов тому или иному собственнику и от способов использования вагонов. Каждая составляющая играет свою роль в общем процессе, так как регламентирует порядок действий участников и устанавливает необходимые параметры грузовых перевозок.

Согласно распоряжению ОАО «РЖД» от 28.12.2012 г. № 2786р «О Едином сетевом технологическом процессе железнодорожных грузовых перевозок», после принятия месячных планов в действующий план формирования поездов вно-

сятся корректировки и ведется постоянный анализ по выявлению: несоответствия отдельных назначений формируемых поездов размерам вагонопотоков; диспропорций в загрузке и использовании перерабатывающей способности станций и сортировочных путей; причин отступлений от плана формирования и порядка направления вагонопотоков.

Вместе с тем определить объемы и направления для порожних вагонопотоков затруднительно, что обусловлено наличием разных собственников подвижного состава и возникающими между ними противоречиями. К тому же невозможность планировать перевозки порожних вагонов заранее приводит к недостоверности рассчитываемых показателей технического нормирования.

Для настоящего времени характерны три основных варианта технологии эксплуатации парка частных вагонов:

собственные вагоны обращаются на закрепленных полигонах, выход на другие полигоны происходит, если чужие вагоны не подаются;

собственные вагоны используются аналогично обменному парку, кроме предприятий с запланированной подачей чужих вагонов, когда последних не хватает;

собственные вагоны передаются в общую схему обращения и регулирования с чужими вагонами.

Однако для успешной организации эксплуатационной работы необходимо регулировать вагонные парки разных собственников по принципам, приближенным к комплексной регулировке. В отличие от груженых вагонов, которые включаются в поезда по назначениям плана формирования согласно указанным в перевозочных документах станциям назначения, порожние вагоны одной и той же специализации могут получать станцию назначения в ходе либо после завершения накопления состава по установленным признакам. Это уже закреплено в распоряжении ОАО «РЖД» от 09.01.2020 г. № 4/р «О внесении изменений в распоряжение ОАО «РЖД» от 28.12.2012 г. № 2786р „О Едином сетевом технологическом процессе железнодорожных грузовых перевозок“».

Оптимизационный расчет корреспонденций порожних вагонопотоков между станциями сбора и распределения порожних вагонов можно производить путем решения транспортной задачи линейного программирования в сетевой постановке (распоряжение ОАО «РЖД» от 14.02.2018 г. № 290р «Методика разработки плановой «шахматки» вагонопотоков в разрезе «станция — станция» и переход на планирование погрузки на предстоящий месяц с детализацией по станциям погрузки и выгрузки при техническом нормировании эксплуатационной работы сети железных дорог» [2].

Но с порожними вагонами такую форму работы использовать невозможно ввиду значительной неравномерности грузовых перевозок в течение месяца, недели и суток. Из-за неравномерного в течение суток и смены (12 ч) отправления вагонов со станций погрузки и прибытия вагонов по граничным станциям возникают избытки вагонного парка, что значительно затрудняет процесс перевозок. Неравномерность эксплуатационной работы зависит от множества факторов, образующих случайный характер колебаний по суткам. Это оказывает существенное влияние на необходимую перевозочную мощность

железнодорожных линий, станций и отдельных участков, а также на организацию перевозочного процесса в целом [3].

Неравномерность перевозок требует увеличения парка подвижного состава, необходимого для выполнения заданных объемов работы. Потребность в вагонном и локомотивном парке напрямую зависит от размеров работы вагонов и локомотивов и эффективности их использования. Поэтому даже временное увеличение объема перевозок приводит к повышению потребности в перевозочных средствах, росту непроизводительных затрат на передвижение подвижного состава в порожнем состоянии, необходимости в излишних емкостях путей. Как следствие, возникает потребность иметь резерв пропускной способности. Изучение проблемы неравномерности и разработка соответствующих механизмов для ее снижения могут кардинально улучшить использование перевозочных средств и сократить потребности в тяговом и вагонном подвижном составе [4].

При использовании частного вагонного парка возникают следующие сложности:

- 1) перенасыщение станций вагонами исключает из работы часть путевого развития и снижает возможности по пропуску и переработке вагонопотоков;
- 2) избыточное насыщение участков сети поездами ведет к необходимости отставлять часть составов без локомотивов на промежуточных станциях, что затрудняет организацию продвижения вагонопотока.

Пример неравномерного подвода поездов к стыковым станциям региона за период, равный 12 ч, показан на рис. 1.

Как видно из рис. 1, прием по стыку А2 варьируется от 3 до 12 поездов в сутки. На основании полученных данных выполнен расчет коэффициента неравномерности (неравномерность перевозок во времени — отношение максимального значения к среднему за период). Для приведенного на рис. 1 примера этот коэффициент изменяется от 1,2 до 1,67, т.е. необходимо значительно увеличивать парк используемых локомотивов.

Зависимости между парками станций, локомотивами, размерами грузового движения и участковой скоростью показы-

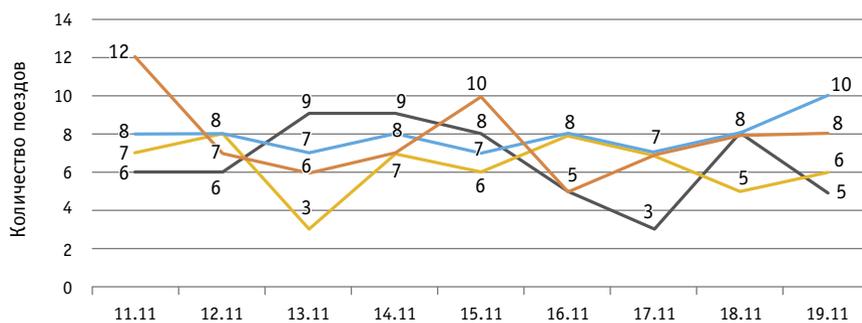


Рис. 1. Прием по стыку А2 за первую смену:
— 18:01–21:00; — 21:01–00:00; — 00:01–3:00; — 3:01–6:00

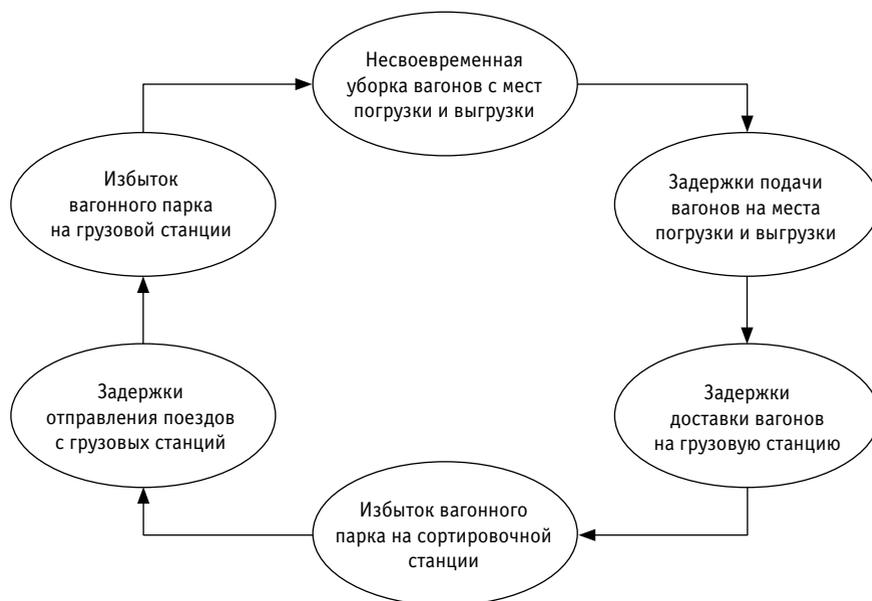


Рис. 2. Циклическая зависимость причинно-следственных связей при организации перевозочного процесса

вают, что требуемые размеры грузового движения, которые могут быть обеспечены поездами и локомотивами, при существующих ограничениях парков ведут к росту потребности в резервах путей. Эти взаимосвязи дают комплексную оценку уровня использования пропускной способности участков исходя из наличия инфраструктуры и тяговых ресурсов, и их можно представить в виде циклической зависимости причинно-следственных связей [4] (рис. 2).

Для «расщипывания» и преодоления затруднений необходимо устранять дефицит емкости путевого развития. Есть два способа:

- 1) экстенсивный — физическое расширение путевого развития;

- 2) интенсивный — улучшение технологии, заменяющее резервы путевого емкости резервами управления.

Интенсивный путь предполагает в первую очередь повышение «глубины прогноза» предстоящих событий, т.е. развитие информационных технологий, обеспечивающих необходимой информацией весь технологический процесс грузовых перевозок. Так как значимый фактор — использование частного подвижного состава и его доступ к железнодорожной инфраструктуре, то основным влияющим элементом является технологическая возможность перевозки порожних вагонопотоков крупных собственников на основе логистических схем работы подвижного состава.

Но цели регулирования вагонного парка, стоящие перед оператором и перевозчиком, не совпадают, и ограничения тоже различны:

для перевозчика:

- 1) допустимая загрузка станций и участков;
- 2) мощность пунктов подготовки вагонов к перевозкам;

для оператора подвижного состава:

1) максимально допустимый парк вагонов на порожнем рейсе;

2) минимально допустимая надежность обеспечения заявок.

Поэтому для оптимизации перевозочного процесса целесообразно объединить усилия разных операторов за счет использования обменного парка, что позволит снизить загрузку инфраструктуры и сократить порожний пробег вагонов. Технологическую цепочку можно представить в виде схемы, показанной на рис. 3.

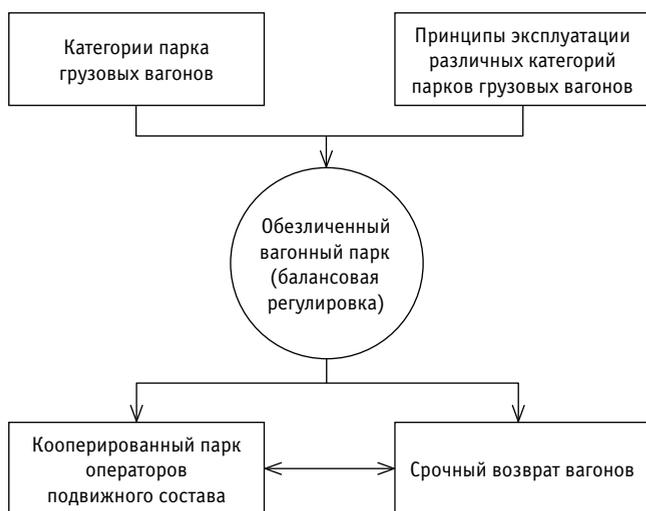


Рис. 3. Технологическая цепочка логистических схем работы подвижного состава

Принятая в России организация грузовых перевозок учитывает особенности географического положения мест погрузки и выгрузки (значительная дальность перевозок) и принадлежность инфраструктуры одному владельцу — ОАО «РЖД» (выбор направления следования по участкам и техническим станциям исходя из загрузки объектов) [5]. Поэтому управление всем перевозочным процессом осуществляется путем технического нормирования эксплуатационной работы, т.е. достигается оптимальное распределение перевозочных средств транспорта на планируемые объемы перевозок, и определяются нормативные показатели по использованию вагонного парка, а на его основе — и локомотивного. Эффективность управления перевозочным процессом оценивается с помощью показателей, характеризующих использование подвижного состава по времени и занятость инфраструктуры станций и участков.

Однако действующие в настоящее время методики технического нормирования содержат ряд существенных недостатков. В частности, такие показатели, как объемы парка вагонов по станциям, размеры передачи поездопотока по сты-

ковым станциям, участковая скорость, простой транзитного и местного вагонов на станциях, простой вагонов под одной грузовой операцией, определяются без учета их зависимости от размеров движения и степени загрузки инфраструктуры. Это относится и к другим показателям, отражающим работу порожних вагонов.

Из-за перечисленных недостатков более предпочтительны оперативные методы управления, использующие информационные системы. Однако в оперативном режиме, в силу значительных объемов информации о вагонопотоках по всем пунктам их нахождения, используются данные о предстоящих событиях только на 3–4 ч вперед. Увеличение глубины прогноза до 6–8 ч лишь немного снижает существующую неравномерность, но не решает проблему кардинально. Главный недостаток — несоответствие планируемых по заявкам грузоотправителей объемов перевозок на месяц фактическому состоянию в среднесуточном исчислении. Причина кроется в том, что система расчета месячного планирования сложилась в периоды стабильности перевозок и отсутствия позволяющих быстро производить любые расчеты информационных технологий.

В настоящее время целесообразно рассматривать объемы перевозок по мере поступления заявок грузоотправителей отдельно на каждые сутки погрузки. Алгоритм принятия решений по организации эксплуатационной работы представлен ниже [2].

1. Обработка заявок грузоотправителей на каждые сутки для разработки плановой «шахматки» груженных вагонопотоков в разрезе «станция — станция» с детализацией по станциям погрузки и выгрузки:

$$\sum N = f(\sum m), \quad (1)$$

где N — количество маршрутов следования отправляемых корреспонденций в заданные сутки;

m — количество и типы заявок на перевозку с учетом числа вагонов.

2. «Накладка» корреспонденций отправок на действующий план формирования поездов для определения маршрута следования и зависящих эксплуатационных затрат на перевозку:

$$\sum E_{\text{эксп}} = f(\sum M_{\text{пфп}}), \quad (2)$$

где $E_{\text{эксп}}$ — зависящие эксплуатационные расходы на перевозку;

$M_{\text{пфп}}$ — варианты маршрутов следования отправок согласно плану формирования поездов.

3. Расчет затрат времени и расходов на следование корреспонденций по участкам, а также на простой корреспонденций при выполнении технологических операций:

$$\sum nt = f(\sum M_{\text{пфп}}; \sum m), \quad (3)$$

где nt — вагоно-часы следования корреспонденций.

В результате расчета «шахматка» груженных вагонопотоков в разрезе «станция — станция» генерируется в формат «дорога — дорога». Формирование «шахматки» порожних вагоно-

потоков в разрезе «станция — станция» производится с учетом балансового метода (критерии — кратчайшее расстояние, минимальные эксплуатационные зависящие затраты, нормативный план формирования). Получаемые таким образом вагонопотоки характеризуют загрузку сети в целом и способствуют последующему расчету технических норм с достаточной степенью точности.

Но, как уже было отмечено, из-за существенной неравномерности перевозок средние значения рассчитываемых показателей не могут обеспечить достоверность в каждый краткосрочный период. Поэтому актуально было бы использовать принципы работы динамической модели, в которой каждая корреспонденция накладывается на путь следования вагонопотоков отдельно в каждые сутки погрузки в соответствии с указанными в заявках грузоотправителей датами погрузки. Далее, имея возможность использовать данные о затратах времени при следовании по участкам сети и о выполнении технических операций на станциях, можно рассчитать, в какой точке сети железных дорог будет находиться грузовая отправка в каждые сутки. Это позволит определять реальную загрузку станций и участков в каждые сутки планируемого периода.

4. Распределение затрат времени посуточно на элементы, входящие в путь следования, для определения их загрузки в каждые сутки при учете календаря отправок:

$$\gamma = f(\sum M_{\text{пфп}}; \sum N; \sum m). \quad (4)$$

Наличие такой информации укажет на степень загрузки объектов во все временные периоды, даст возможность своевременно корректировать направление следования вагонопотоков, будет способствовать принятию рациональных решений по их изменению заранее в плановом режиме.

При таком подходе для компании-перевозчика экономический результат от внедрения технологических мер можно представить в виде решения задачи с целевой функцией минимизации зависящих эксплуатационных расходов на перевозку.

5. Определение рабочего парка вагонов и локомотивов:

$$\sum n, \sum M = f(\gamma), \quad (5)$$

где n и M — рабочий парк вагонов и локомотивов соответственно.

Результат от минимизации данной функции зависит от качества практической реализации таких критериев, как следование отправок по кратчайшему расстоянию с минимально воз-

можным числом переработок вагонопотока и конкретизация вагонопотоков по роду груза, типу подвижного состава и компаниям-собственникам [6].

По мере получения заявок отправителей (операторов подвижного состава), которым в настоящее время затруднительно заранее точно планировать перевозки порожних вагонов, необходимо сопоставление данных заявок по периодам с базовой «шахматкой». Это позволит определить пути следования планируемых порожних вагонопотоков по сравнению с оптимальным по ранее выбранным критериям. При наличии существенных различий между вариантами следования порожних вагонов каждого оператора и варианта, оптимального для перевозчика, целесообразно предложить операторам изменить первоначальный вариант. Чтобы заинтересовать операторов в принятии предлагаемого автоматизированной системой плана за адресовки порожних вагонов вместо запланированного самим оператором, можно применять экономические стимулы, т.е. компенсировать отдельным операторам излишние затраты. Возможно совместное использование парка разных операторов, так как это позволит снизить их затраты на перемещение порожних вагонов за счет сокращения встречного порожнего пробега.

Кроме того, для сокращения непроизводительных простоев вагонов и локомотивов целесообразно сравнить расчетную (γ_p) и наличную (γ_n) загрузку выбранного элемента инфраструктуры:

$$\gamma_p \leq \gamma_n. \quad (6)$$

Предлагаемые меры будут способствовать реализации в планируемом периоде технологических решений, прежде всего логистического принципа «точно в срок», необходимого для поддержания соответствующих резервов инфраструктуры и более регламентированного взаимодействия с грузополучателем, особенно с припортовой станцией [6].

Динамическая модель дает возможность сократить оборот вагона (это основной качественный показатель эксплуатационной работы), так как позволяет использовать более точные данные о планируемых вагонопотоках. Перечисленные факторы, влияющие на оборот вагонов, отражают элементы технологии процесса перевозок. Но для этого требуется переход технического нормирования к более кратким срокам: на декаду, пятидневку и т.д. Дальнейшие исследования авторов будут направлены на разработку такого критерия минимизации эксплуатационных затрат, как сокращение числа переработок вагонопотока в пути следования.

Литература

1. Бородин А. Ф. Технологическое обеспечение перевозочно-го процесса // Железнодорожный транспорт. 2013. № 3. С. 33–36. ISSN 0044–4448.
2. Методика разработки плановой «шахматки» вагонопотоков в разрезе «станция — станция» и переход на планирование погрузки на предстоящий месяц с детализацией по станциям погрузки и выгрузки при техническом нормировании эксплуатационной работы сети железных дорог : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.02.2018 г. № 290р.
3. Осминин А. Т. Научное обоснование направлений повышения эффективности управления перевозочным процессом // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2016. № 3. С. 28–40. ISSN 2304–9642.
4. Танайно Ю. А., Югина О. П., Жарикова Л. С. Определение критериев для оценки принимаемых решений при организации грузовых перевозок на полигоне железных дорог // Политранспортные системы : сборник материалов X Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 15–16 ноября 2018 г. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2019. С. 193–196.
5. Технология автоматизированного планирования и управления маршрутными перевозками / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, С. Л. Щепанов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2018. № 3. С. 8–15. ISSN 0044–4448.
6. Югина О. П., Танайно Ю. А., Жарикова Л. С. Эффективность маршрутизации грузовых перевозок // Железнодорожный транспорт. 2020. № 6. С. 14–18. ISSN 0044–4448.

Объем статьи 0,7 авторских листа

References

1. Borodin A. F. Technological provision of service [Tekhnologicheskoe obeshpechenie perevoznogo protsesssa] // Railway Transport. 2013. No. 3. Pp. 33–36. ISSN 0044–4448.
2. Method of creation of planned car traffic correspondence in the «station — station» view and transition to planning of loading for upcoming month with detailing by stations of loading and unloading at technical standardization of operation of railway system [Metodika razrabotki planovoy «shakhmatki» vagonopotokov v razreze «stantsiya — stantsiya» i perekhod na planirovanie pogruzki na predstoyashhiy mesyats s detalizatsiyey po stantsiyam pogruzki i vygruzki pri tekhnicheskoy normirovaniy ekspluatatsionnoy raboty seti zheleznykh dorog] : approved by the Order of JSC «RZD» dated 14.02.2018 No. 290r.
3. Osminin A. T. Scientific substantiation of directions of increasing the efficiency of traffic control [Nauchnoye obosnovaniye napravleniy povysheniya effektivnosti upravleniya perevoznym protsessom] // Bulletin of Joint Scientific Council of JSC «Russian Railways». 2016. No. 3. Pp. 28–40. ISSN 2304–9642.
4. Tanayno Yu. A., Yugrina O. P., Zharikova L. S. Determination of criteria for assessment of decisions at organization of freight service on railway polygon [Opredeleniye kriteriev dlya otsenki prinimaemykh resheniy pri organizatsii gruzovykh perevozok na poligone zheleznykh dorog] // Polytransport systems : proceedings of 10th International scientific and technical conference, Novosibirsk, November 15–16, 2018. Novosibirsk : Publishing House of STU, 2019. Pp. 193–196.
5. Technology of computer-aided planning and control of route traffic [Tekhnologiya avtomatizirovannogo planirovaniya i upravleniya marshrutnymi perevozkami] / A. F. Borodin, V. V. Panin, S. L. Shhepanov [et al.] // Railway Transport. 2018. No. 3. Pp. 8–15. ISSN 0044–4448.
6. Yugrina O. P., Tanayno Yu. A., Zharikova L. S. Efficiency of freight traffic routing [Effektivnost' marshrutizatsii gruzovykh perevozok] // Railway Transport. 2020. No. 6. Pp. 14–18. ISSN 0044–4448.

УДК 629.423.3

Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Александр Тахирович Шарапов, ассистент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Михаил Станиславович Чепижко, ассистент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ГРУЗОВОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КОРРИГИРОВАНИЯ

Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Takhirovich Sharapov, Assistant Lecturer, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Mikhail Stanislavovich Chepizhko, Assistant Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Design calculation of gearwheel for freight electric locomotive with optimal parameters of correlation adjustment

Аннотация

В результате выполненного авторами исследования установлено, что одной из основных причин, приводящих к выходу из строя тягового редуктора грузового электровоза 2ЭС6, являются ошибки в проектировании зубчатой передачи. Для повышения ресурса зубчатой передачи предложен способ ее перепроектирования с корректировкой коэффициентов смещения. Разработана цилиндрическая эвольвентная косозубая передача. При помощи моделирования в приложении «Валы и механические передачи» системы КОМПАС-3D получены прочностные и геометрические параметры скорректированной зубчатой передачи, отвечающей всем требованиям надежности. Выполнен расчет на долговечность, подтверждающий правильность полученных значений. В целом использование разработанной модели с оптимальными параметрами корригирования будет способствовать снижению числа отказов тягового редуктора.

Ключевые слова: тяговый редуктор, зубчатая передача, грузовой электровоз, корректирование, коэффициент смещения, отказ, корригирование.

Summary

In result of the study the authors have established that mistakes in design a gearwheel are among main reasons that lead to a failure of a gearwheel for the 2ES6 freight electric locomotive. In order to increase life of the gearwheel they suggest a method for its redesign with adjustment of offset coefficients. The authors have developed a cylindrical involute helical gearwheel. With the use of modeling in the «Shafts and mechanical gears» application within the framework of the KOMPAS-3D system the authors have got strength and geometrical parameters of the redesigned gearwheel that meets all reliability requirements. Moreover, they have carried out a durability calculation that has confirmed correctness of gained values. As a result, the use of the developed model with optimal parameters of correlation adjustment will contribute to a decrease of a number of traction gearbox failures.

Keywords: traction gearbox, gearwheel, freight electric locomotive, adjustment, offset coefficient, failure, correlation adjustment.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-30-34

Как показывает анализ статистических данных, один из самых уязвимых элементов механической части тягового привода грузовых электровозов — тяговый редуктор: именно он испытывает повышенные динамические нагрузки, которые постепенно снижают работоспособность электровоза в целом [1]. Причем из-за конструктивных недостатков тяговые приводы с опорно-осевыми редукторами наиболее предрасположены к отказам.

Для исследования причинно-следственных связей между отказами тягового редуктора грузового электровоза 2ЭС6 и разного рода повреждениями, неисправностями на основе данных, представленных в работах [1–5], была построена диаграмма Исикавы (рис. 1).

Отказы тягового редуктора грузового электровоза целесообразно разделить на две группы: внезапные (скачкообразное и неконтролируемое изменение параметров) и параметрические (постепенное изменение параметров). К основным причинам, приводящим к образованию внезапных отказов, следует отнести всевозможные трещины, сколы, изломы элементов конструкции тягового редуктора и т. п. К группе параметрических отказов, при которых функционирование системы сохраняется в течение продолжительного времени, относятся увеличение диаметра отверстия под болт, усталостное выкрашивание поверхностей зубьев, ослабление посадки малой шестерни, задиры вследствие заедания и др.

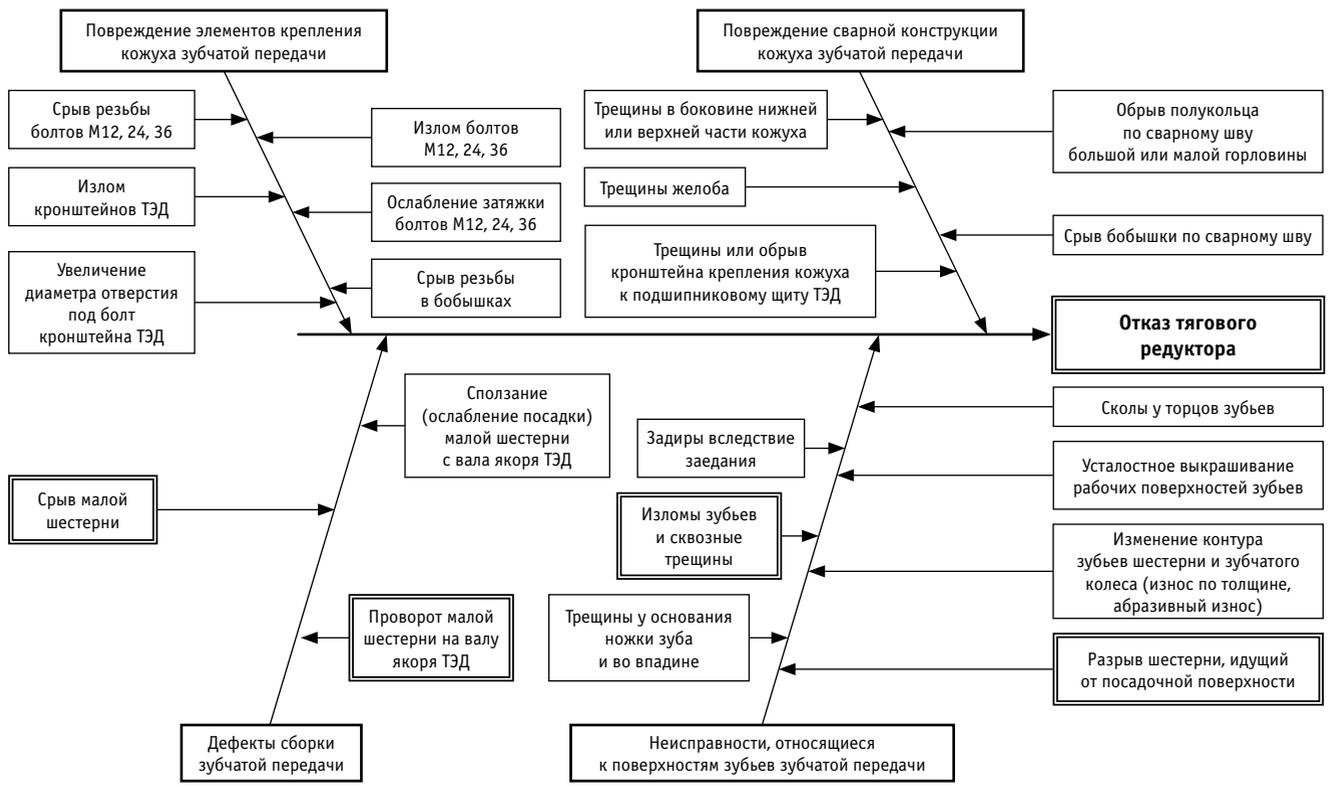


Рис. 1. Причины отказов тягового редуктора грузового электровоза 2ЭС6 в виде диаграммы Исикавы

Следует подчеркнуть, что особое влияние оказывают внезапные отказы, которые не позволяют электровозу с включенными тяговыми электродвигателями (ТЭД) продолжать движение. Такие причины, как срыв и проворот малой шестерни, разрыв шестерни, идущий от посадочной поверхности, изломы зубьев и сквозные трещины, — основные причины выхода из строя тягового редуктора.

Чтобы предотвратить появление вышеописанных дефектов, необходимо усовершенствовать технологию посадки шестерни на вал ТЭД грузового электровоза (на это будут направлены дальнейшие исследования авторов), оценить ресурс применяемой зубчатой передачи и впоследствии создать ее модель с оптимальными параметрами корригирования, т.е. с повышенной износостойкостью, устойчивостью к контактным и изгибным напряжениям, виброустойчивостью, бесшумностью и плавностью работы. Под оптимальностью в данном случае понимаются минимальные изменения в геометрии, которые позволят повысить качество зацепления зубчатых передач электровозов 2ЭС6 [6].

Настоящее исследование направлено на повышение надежности тягового редуктора грузового электровоза 2ЭС6 за счет перепроектирования его основного элемента — зубчатой передачи.

Математическое моделирование зубчатых передач заключается в геометрическом (по ГОСТ 16532–70 [7]), а также прочностном расчете (по ГОСТ 21354–87 [8]) с целевой функцией, выстраиваемой по совокупности критериев [9].

Авторами было отмечено несоответствие между заявленным в руководстве по эксплуатации грузового электровоза 2ЭС6 [10] значением коэффициента перекрытия и значением, полученным при ручном расчете [11, 12] (в приведенных работах была допущена ошибка — величина коэффициента осевого перекрытия должна быть в 2 раза больше, так как зубчатая передача грузового электровоза 2ЭС6 двусторонняя). При изначально заданных коэффициентах смещения ($x_1 = 0,36786$ и $x_2 = 0,35633$) уже невозможно добиться межосевого расстояния (централи), равного 617,5 мм. Поэтому расчет с заведомо неверными исходными данными не имеет смысла.

После автоматизированного расчета зубчатой передачи, выполненного в приложении «Валы и механические передачи» системы КОМПАС-3D (оптимизация зубчатого зацепления осуществляется методом SUMT Фиакко и Маккормика) был получен геометрический и прочностной расчет скорректированной (отвечающей всем требованиям надежности) зубчатой передачи грузового электровоза 2ЭС6.

Проверка получения желаемого результата межосевого расстояния ($a_w = 617,5$ мм) при оптимальных (для электровоза 2ЭС6) коэффициентах смещения ($x_1 = 0,3726$ и $x_2 = 0,374$) представлена ниже.

Коэффициент суммы смещений x_Σ :

$$x_\Sigma = x_1 + x_2, \tag{1}$$

$$x_\Sigma = 0,3726 + 0,374 = 0,7466 \text{ мм.}$$

Угол профиля α_t :

$$\operatorname{tg} \alpha_t = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_t = \frac{0,363970}{0,909404} = 0,400229;$$

$$\alpha_t = 21,812720^\circ.$$

$$a_w = \frac{(25 + 86) \cdot 10 \cdot 0,928403}{2 \cdot 0,909404 \cdot 0,917565} = 617,49836 \text{ мм.}$$

Для известного «пробега» зубчатой передачи ($L_{\text{п}} = 1,8$ млн км) несложно найти планируемый срок ее службы при технической скорости движения электровоза ($V_{\text{тех}}$), равной 45 км/ч:

$$L_p = L_{\text{п}} / V_{\text{тех}} \quad (5)$$

Угол зацепления $\alpha_{\text{тв}}$:

$$\operatorname{inv} \alpha_{\text{тв}} = \frac{2 \cdot x_{\Sigma} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{Z_1 + Z_2} + \operatorname{inv} \alpha_t, \quad (3)$$

$$\operatorname{inv} \alpha_{\text{тв}} = \frac{2 \cdot 0,7466 \cdot 0,36397}{25 + 86} + 0,019525 = 0,024421;$$

$$\alpha_{\text{тв}} = 23,427318^\circ.$$

$$L_p = 1800000 / 45 = 40000 \text{ ч.}$$

Межосевое расстояние a_w :

$$a_w = \frac{(Z_1 + Z_2) \cdot m \cdot \cos \alpha_t}{2 \cdot \cos \beta} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{\text{тв}}}, \quad (4)$$

По результатам математического моделирования цилиндрической эвольвентной зубчатой передачи внешнего зацепления получены геометрический (табл. 1), прочностной (табл. 2) расчеты, а также расчет на долговечность (табл. 3). В этих таблицах приведены только основные расчетные параметры. Исходные данные, за исключением коэффициентов смещения зубчатых колес, приняты в соответствии с руководством по эксплуатации [10]. При геометрическом расчете цилиндрической эвольвентной зубчатой передачи выполнены все необходимые проектировочные условия: возможность измерения постоянной хорды, отсутствие подрезания, отсутствие заострения, отсутствие подрезания зуба производящей рейкой, отсутствие интерференции, отсутствие самопересечения контура выреза зуба и др.

Таблица 1

Расчет геометрии цилиндрической зубчатой передачи внешнего зацепления

Наименование и обозначение параметра		Шестерня	Зубчатое колесо
Количество зубьев	z	25	86
Угол зацепления	$\alpha_{\text{тв}}$	23° 25' 39"	
Диаметр делительный, мм	d	274,905	945,675
Диаметр основной, мм	d_b	255,223	877,967
Диаметр вершин зубьев, мм	d_a	301,843	972,641
Диаметр впадин зубьев, мм	d_f	257,357	928,155
Диаметр начальный, мм	d_w	278,153	956,847
Постоянная хорда, мм	\bar{s}_c	16,266 ^{-0,16} _{-0,3}	16,275 ^{-0,25} _{-0,43}
Высота до постоянной хорды, мм	\bar{h}_c	10,509	10,521
Длина общей нормали, мм	W	110,460	357,832
Нормальная толщина зуба по делительной окружности, мм	s_n	18,42 ^{-0,16} _{-0,3}	18,43 ^{-0,25} _{-0,43}
Нормальная толщина зуба на поверхности вершин, мм	s_{na}	6,741	7,992
Коэффициент наименьшего смещения	x_{min}	-0,898	-5,528
Удельное скольжение профилей зубьев в нижних точках активных профилей зубьев	θ_p	-0,67947	-0,68056
Коэффициент торцового перекрытия	ε_{α}	1,383	
Коэффициент осевого перекрытия	ε_{β}	2,383	
Коэффициент перекрытия	ε_{γ}	3,766	

Таблица 2

Прочностной расчет при действии максимальной нагрузки на цилиндрическую зубчатую передачу

Наименование и обозначение параметра		Шестерня	Зубчатое колесо
Окружная скорость в зацеплении, м/с	v	10,796	
Контактное расчетное напряжение, МПа	σ_{Hmax}	561,445	
Контактное допускаемое напряжение, МПа	σ_{HPmax}	2728	2172,808
Коэффициент запаса по контактным напряжениям	n_H	4,859	3,87
Изгибное расчетное напряжение, МПа	σ_{Fmax}	85,53	84,426
Изгибное допускаемое напряжение, МПа	σ_{FPmax}	1478,767	1065,966
Коэффициент запаса по напряжениям изгиба	n_F	17,289	12,626

Таблица 3

Расчет на долговечность цилиндрической зубчатой передачи

Крутящий момент на ведущем колесе, Н·м		Частота вращения ведущего колеса, об/мин	Продолжительность работы передачи на данном режиме, %	Число циклов нагружения, млн	Контактное напряжение, МПа	Изгибное напряжение, МПа		
Контакт	Изгиб					Шестерня (1)	Зубчатое колесо (2)	
T_{Hi}	T_{Fi}	n_{li}	—	N_{ei}	σ_{Hi}	σ_{F1i}	σ_{F2i}	
9355	9355	770	90	1247,4	541,189	78,604	77,589	
10300	10300	750	10	135	561,445	85,53	84,426	
Наименование и обозначение параметра						Шестерня	Зубчатое колесо	
Изгибные допускаемые напряжения, МПа						σ_{FP}	424,847	206,238
Контактные допускаемые напряжения, МПа						σ_{HP}	1117,033	812,334
Ресурс по изгибным напряжениям, ч						L_F	max	max
Ресурс по контактным напряжениям, ч						L_H	max	284968

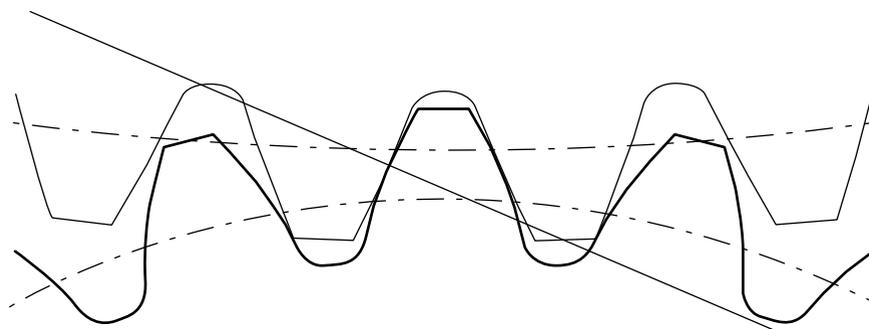


Рис. 2. Визуализация зацепления зубчатой передачи грузового электровоза 2ЭС6 с оптимальными параметрами зацепления

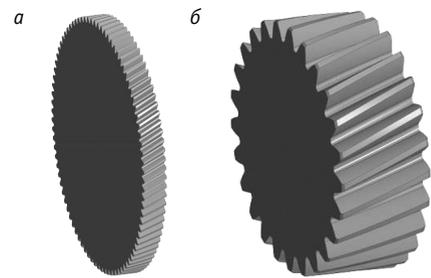


Рис. 3. Модели венцов полушевронов зубчатой передачи:

а — большое зубчатое колесо; б — шестерня

Визуализация зацепления косозубой эвольвентной цилиндрической зубчатой передачи с корректными коэффициентами смещения представлена на рис. 2.

По результатам расчета выполнены модели венцов полушевронов зубчатой передачи с оптимальными параметрами корригирования для грузового электро-

воза 2ЭС6 (рис. 3), отвечающие требованиям надежности (приведены зубчатые колеса с левым наклоном зубьев).

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы: расчет геометрии при выборе корректных коэффициентов смещения завершается получением значения коэффи-

циента перекрытия ($\epsilon_\gamma = 3,766$), который указывает на высокую, но не максимально возможную плавность, бесшумность и непрерывность зацепления;

из прочностного расчета следует, что коэффициенты запаса по контактным (n_H) и изгибным (n_F) напряжениям для ведущего ($n_H = 4,859$; $n_F = 17,289$) и ведо-

мого ($n_H = 3,87$; $n_F = 12,626$) колес находятся на достаточном уровне, обеспечивающем необходимую прочность при воздействии максимальных нагрузок;

расчет на долговечность показывает, что зубчатая передача при указанных исходных данных (при выборе корректных коэффициентов смещения) вырабатывает свой ресурс по изгибным и контактным напряжениям ($L_p = 40000$ ч).

Следует отметить, что показатели качества зацепления [6] даже для зубчатой передачи с оптимальными параметрами корригирования неидеальны, т.е. могут стать причиной частых отказов. Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на проектирование улучшенной зубчатой передачи с совершенно иной геометрией.

Эксплуатируемая в настоящее время зубчатая передача грузового электровоза 2ЭС6 не обеспечивает высокую нагрузочную способность и износоустойчивость, так как параметры корригирования зубьев при заданном межосевом расстоянии выбраны неверно. Использование разработанной модели с оптимальными параметрами корригирования будет способствовать снижению количества отказов тягового редуктора.

Результаты исследования могут быть применены при разработке скорректированной зубчатой передачи электровоза 2ЭС6 и являются примером правильного подбора параметров корригирования при заданном межосевом расстоянии.

Литература

1. Буйносов А. П., Юдт Е. С., Шарапов А. Т. Анализ основных причин отказов тяговых передач электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 3. С. 14–17. ISSN 2079–5920.
2. Буйносов А. П., Шарапов А. Т. Влияние износа элементов тяговой передачи на долговечность привода грузовых электровозов // Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С. 61–63. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-61-63. ISSN 1815–9400.
3. Чеботарев Е. А., Губарев П. В., Глазунов Д. В. Повышение надежности тяговой зубчатой передачи грузовых электровозов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 8. С. 379–383. ISSN 0202–3350.
4. Москвичев В. В., Чабан Е. А., Андриевский А. Г. Проблемы кожухов зубчатой передачи электровозов: отказы, нагруженность, виброзащита // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 1 (65). С. 31–42. ISSN 1813–9108.
5. О вибрации колесно-моторного блока вследствие взаимодействия колеса с рельсом и работы зубчатой передачи электровоза 3ЭС5К в условиях горно-перевального участка / А. Ю. Портной, О. В. Мельниченко, К. П. Селедцов [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 3 (152). С. 527–547. ISSN 1814–3520.
6. Буйносов А. П., Шарапов А. Т., Чепижко М. С. Совершенствование методики расчета качественных показателей зацепления грузового электровоза // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 10. С. 98–101. ISSN 2079–5920.
7. ГОСТ 16532–70 (дата актуализации текста: 06.04.2015). Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии. Москва : Издательство стандартов, 1983. 43 с.
8. ГОСТ 21354–87 (дата актуализации текста: 06.04.2015). Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. Москва : Издательство стандартов, 1993. 129 с.
9. Голованев В. Применение оптимизационных методов и интерактивного блокирующего контура при выборе коэффициентов смещения (корригирования) цилиндрических эвольвентных зубчатых передач внешнего зацепления // САПР и графика. 2014. № 11 (217). С. 89–93. ISSN 1560–4640.
10. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / Под ред. В. В. Брексона. Верхняя Пышма : ООО «Уральские локомотивы», 2015. 328 с.
11. Буйносов А. П., Шарапов А. Т., Чебаков С. А. Проверка качества зацепления тяговой зубчатой передачи электровоза 2ЭС6 // Вестник УрГУПС. 2020. № 4 (48). С. 13–20. DOI: 10.20291/2079–0392-2020-4-13-20. ISSN 2079–0392.
12. Буйносов А. П., Шарапов А. Т. Исследование качества зацепления тяговой зубчатой передачи электровоза 2ЭС6 по геометрическим показателям // Наука и образование транспорта. 2020. № 1. С. 29–33.

References

1. Buinsov A. P., Yudt E. S., Sharapov A. T. Analysis of the main reasons for failures of electric truck transmissions [Analiz osnovnykh prichin otkazov tyagovoykh peredach elektrovozov] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2020. No. 3. Pp. 14–17. ISSN 2079–5920.
2. Buynosov A. P., Sharapov A. T. Influence of wear of traction transmission elements on life of drives of freight electric locomotives [Vliyaniye iznosa elementov tyagovoy peredachi na dolgovечnost' privoda gruzovykh elektrovozov] // Transport of the Urals. 2021. No. 1 (68). Pp. 61–63. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-61-63. ISSN 1815–9400.
3. Chebotarev E. A., Gubarev P. V., Glazunov D. V. Increasing the reliability of traction gears electric freight locomotives [Povysheniye nadezhnosti tyagovoy zubchatoy peredachi gruzovykh elektrovozov] // Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making. 2017. No. 8. Pp. 379–383. ISSN 0202–3350.
4. Moskvichev V. V., Chaban E. A., Andrievskiy A. G. Problems of gear casing of electric locomotives: failures, loading, vibration insulation [Problemy kozhukhov zubchatoy peredachi elektrovozov: otkazy, nagruzhennost', vibrozashchita] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2020. No. 1 (65). Pp. 31–42. ISSN 1813–9108.
5. Study into vibration effects due to the wheel-rail interaction on the operation of an 3ES5K electric locomotive gear transmission under conditions of mountain pass traversal [O vibratsii kolesno-motornogo bloka vsledstviye vzaimodeystviya kolesa s rel'som i raboty zubchatoy peredachi elektrovoza 3ES5K v usloviyakh gorno-pereval'nogo uchastka] / A. Yu. Portnoy, O. V. Melnichenko, K. P. Seledtsov [et al.] // Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020. Vol. 24. No. 3 (152). Pp. 527–547. ISSN 1814–3520.
6. Buinsov A. P., Sharapov A. T., Chepizhko M. S. Improvement of the methodology for calculating the qualitative indicators of the traction gear transmission of the electric freight locomotive [Sovershenstvovaniye metodiki rascheta kachestvennykh pokazateley zatsepleniya gruzovogo elektrovoza] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2021. No. 10. Pp. 98–101. ISSN 2079–5920.
7. GOST 16532–70. Cylindrical involute external gear pairs. Calculation of geometry [Peredachi zubchatye tsilindricheskie evol'ventnye vneshnego zatsepleniya. Raschet geometrii]. Moscow : Publishing House of Standards, 1983. 43 p.
8. GOST 21354–87. Cylindrical involute gears of external engagement. Strength calculation [Peredachi zubchatye tsilindricheskie evol'ventnye vneshnego zatsepleniya. Raschet na prochnost']. Moscow : Publishing House of Standards, 1993. 129 p.
9. Golovanov V. Application of optimization methods and interactive limiting contour at selection of offset coefficients (correlation adjustment) for cylindrical involute gearwheels with external gearing [Primeneniye optimizatsionnykh metodov i interaktivnogo blokiryuyushhego kontura pri vybore koeffitsientov smesheniya (korrigirovani) tsilindricheskikh evol'ventnykh zubchatykh peredach vneshnego zatsepleniya] // CAD and graphics. 2014. No. 11 (217). Pp. 89–93. ISSN 1560–4640.
10. Electric locomotive 2ES6 «Sinar» [Elektrovoz 2ES6 «Sinar»] / Ed. by V.V. Brekson. Verkhnyaya Pyshma : Ural Locomotives LLC, 2015. 328 p.
11. Buinsov A. P., Sharapov A. T., Chebakov S. A. Checking the quality of engagement of the traction gear of an electric locomotive 2ES6 [Proverka kachestva zatsepleniya tyagovoy zubchatoy peredachi elektrovoza 2ES6] // Herald of the USURT. 2020. No. 4 (48). Pp. 13–20. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-4-13-20. ISSN 2079–0392.
12. Buynosov A. P., Sharapov A. T. Study of gearing quality of traction gearwheel for 2ES6 electric locomotive according to geometrical indicators [Issledovaniye kachestva zatsepleniya tyagovoy zubchatoy peredachi elektrovoza 2ES6 po geometricheskim pokazatelyam] // Science and Education for Transport. 2020. No. 1. Pp. 29–33.

Объем статьи 0,56 авторских листа

УДК 629.423.1:519.234

Антон Владимирович Бублик, ведущий инженер-конструктор ООО «ТПИ», Омск, Россия,
Владимир Васильевич Бублик, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Николай Васильевич Есин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Олег Владимирович Гателюк, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

СНИЖЕНИЕ ИЗДЕЖЕК ПРИ ВЫБОРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Anton Vladimirovich Bublik, Lead Engineer, Transprojectautomation LLC, Omsk, Russia,
Vladimir Vasilyevich Bublik, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Nikolay Vasilyevich Esin, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Oleg Vladimirovich Gatelyuk, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Higher Mathematics Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Decrease of expanses at selection of technological equipment of inspection bench for auxiliary electrical machines of electric motive power

Аннотация

По результатам анализа номенклатуры вспомогательных машин постоянного и переменного тока рассмотрены критерии выбора технологического оборудования испытательного стенда. Стенд предназначен для проведения приемо-сдаточных испытаний вспомогательных электрических машин, используемых на электроподвижном составе, методом взаимной нагрузки с максимальным использованием его технических возможностей.

Ключевые слова: вспомогательная электрическая машина, оптимизация, асинхронный короткозамкнутый двигатель, метод взаимной нагрузки, приемо-сдаточные испытания.

Summary

On the basis of analysis of direct and alternating current auxiliary machines the authors have considered criteria of selection of technological equipment for an inspection bench. The inspection bench is designed for carrying out acceptance tests of auxiliary electrical machines used in electric motive power by a back-to-back method with the maximum use of its technical feasibility.

Keywords: auxiliary electrical machine, optimization, induction squirrel-cage motor, back-to-back method, acceptance tests.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-35-40

Современный этап в России характеризуется дальнейшим развитием рыночных отношений, которые жестко диктуют требования к минимизации расходов и максимизации прибыли в работе компаний. На локомотиворемонтных предприятиях (сервисных локомотивных депо либо заводах) для выполнения качественного ремонта используется разнообразное испытательное оборудование (стенды). При подборе его номенклатуры нередко возникают затруднения, связанные с отсутствием конкретного оборудования, что может приводить к ошибкам в выборе и к непроизводительным расходам (затратам).

Целью представленной статьи являются рекомендации по снижению издержек в процессе выбора технологического оборудования при создании стендов, предназначенных для приемо-сдаточных испытаний вспомогательных электрических машин (ВЭМ) электроподвижного состава (ЭПС).

Вспомогательные электрические машины электроподвижного состава (электровозов, электропоездов, вагонов метрополитена, тепловозов), в качестве которых используются двигатели как постоянного, так и переменного тока (преимущественно асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором) [1], наиболее востребованы и выпускаются заводами-изготовителями в большом количестве. Своевременное техническое диагностирование для определения ресурса ВЭМ — важная составляющая технологического процесса их обслуживания и ремонта, способствующая снижению аварий, оптимизации расходов и потерь, связанных с внеплановыми ремонтами электромеханического оборудования ЭПС.

При эксплуатации ВЭМ из-за наработки и воздействия неблагоприятных факторов, особенно механической природы, вызывающих повышенные вибрации оборудования электроподвижного состава, происходят качественные и количественные изменения, в том числе механический износ деталей (подшипников, электрощеток, рабочей поверхности коллектора, межвитковые замыкания обмоток якоря и статора, обрывы стержней ротора и т.д.). Причем некоторые неисправности (например, нарушение крепления обмотки якоря, ухудшение контактов в паяных соединениях и др.) могут быть практически незаметными вплоть до отказа ВЭМ. Поэтому для контроля технического состояния таких двигателей важно использовать неразрушающие методы.

Разработка и изготовление новых автоматизированных испытательных стендов на базе современной вычислительной техники весьма актуальная задача. В промышленных условиях выполнение соответствующих измерений для достоверного диагностирования состояния ВЭМ часто вызывает затруднения, преодолеть которые помогает использование автоматизированных испытательных стендов.

В настоящее время для проведения приемо-сдаточных испытаний вспомогательных электрических машин электроподвижного состава на испытательных стендах применяют высокоточные цифровые приборы с записывающими устройствами, позволяющими не только измерять любые параметры ВЭМ, но также фиксировать их значения и создавать необходимые базы данных. Это обеспечивает высокую достоверность и объективность оценки получаемых результатов, повышает культуру проведения испытаний [2, 3].

Необходимо отметить, что в сравнении с тяговыми электрическими двигателями вспомогательные электрические машины сложнее по конструкции и разнообразнее по назначению и применению на ЭПС. Поэтому их принято называть агрегатами, состоящими из собственно вспомогательной машины-агрегата (вентилятора, компрессора либо насоса) и приводного электродвигателя. Кроме того, в качестве ВЭМ используют также машинные преобразователи тока: мотор-генераторы, делители напряжения (динамоторы), преобразователи фаз (расщепители). В целом насчитывается значительное разнообразие типов и конструкций ВЭМ, что затрудняет их обслуживание на сервисных предприятиях и вызывает необходимость создания классификации, позволяющей унифицировать оборудование испытательных стендов [4].

Как известно, на ЭПС постоянного тока для привода таких машин-агрегатов используют двигатели постоянного тока высокого напряжения, которые, как правило, проектируют на полное напряжение питающей сети. Например, двигатель компрессорной установки большинства моторных вагонов отечественных электропоездов постоянного тока, предназначенный для обеспечения сжатым воздухом пневматических приборов цепей управления электропоезда и автоматических тормозов, изготовлен на напряжение 1500 В и питается от делителя напряжения [5].

На ЭПС переменного тока применяются и двигатели постоянного тока (низкого напряжения — до 220 В), которые питаются пульсирующим током от полупроводниковых выпрямителей, и асинхронные короткозамкнутые двигатели (АД).

Последние изготавливаются либо конденсаторными — для прямого включения на однофазное напряжение вспомогательной обмотки трансформатора, либо трехфазными — для питания от расщепителя фаз. Гораздо реже используются однофазные асинхронные двигатели с пусковой фазой, в цепь которой при пуске вводится фазосдвигающее активное или емкостное сопротивление [6].

АД начинают применять и на электропоездах постоянного тока, при этом питание трехфазным током осуществляется от машинного преобразователя постоянного тока высоковольтного напряжения [7].

Таким образом, ВЭМ можно классифицировать для ЭПС как постоянного, так и переменного тока по основным известным принципам [1].

Классификация электрических машин по назначению включает в себя вышеперечисленные категории. Что же касается классификации по роду тока, то она стандартная: это коллекторные и бесколлекторные ВЭМ. К коллекторным относятся все машины постоянного и пульсирующего тока, к бесколлекторным — асинхронные и синхронные электрические машины, в частности расщепители фаз [1].

По номинальной мощности ВЭМ можно подразделить на четыре основных вида:

- сверх малой мощности (от 0,04 до 0,5 кВт);
- малой мощности (от 0,5 до 4 кВт);
- средней мощности (от 4 до 25 кВт);
- большой мощности (от 25 до 100 кВт).

В зависимости от способа питания ВЭМ делятся на группы, питающиеся:

- непосредственно от контактной сети;
- от контактной сети через преобразователь собственных нужд;
- от контактной сети через обмотку собственных нужд тягового трансформатора и расщепитель фаз;
- от обмотки тягового генератора или генератора цепей управления.

На электроподвижном составе для привода компрессорных установок (основного и вспомогательного) применяются асинхронные электрические машины и машины постоянного тока [4] (рис. 1).

Чтобы определить возможности унификации испытательного оборудования, сгруппируем перечисленные машины по следующим критериям: роду тока, мощности и напряжению питания (табл. 1). Цветовая градация ячеек табл. 1 указывает на возможность унификации испытательного оборудования для данной категории электрических машин. Например, выделенные светло-зеленым цветом ячейки означают, что асинхронные двигатели 4АЖ-160М602, АОС2-62-6, АТ160М602 имеют одинаковые технические характеристики и незначительный разброс по габаритно-установочным параметрам. Однако в данной группе есть электрические машины МВ-11 и МВ-14 (мотор-вентиляторы) [8], название которых выделено красным цветом, это говорит о том, что они эквивалентны только по электрическим параметрам, но различны по конструкции (асинхронные электрические машины с внешним короткозамкнутым ротором) [7], следовательно, для их испытаний требуется отдельное испытательное поле (постамент).

Таблица 1

Группировка электрических машин по мощности и напряжению питания

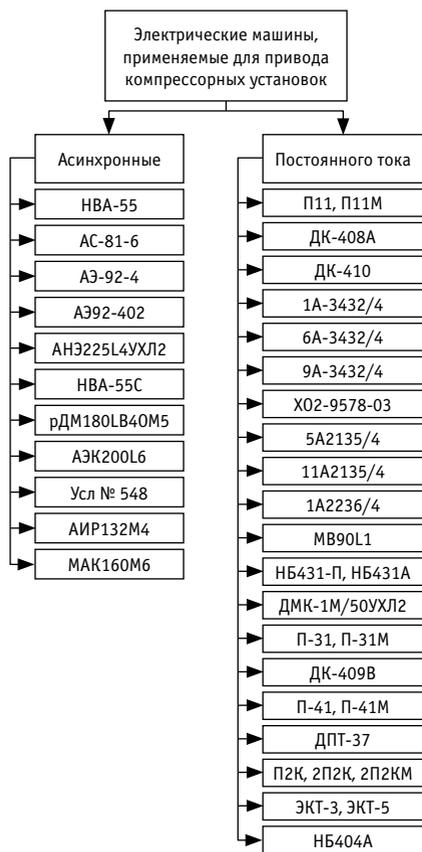


Рис. 1. Электрические машины, применяемые для привода компрессоров и компрессорных установок

Подобная таблица позволяет унифицировать многообразие применяемых на подвижном составе ВЭМ и минимизировать необходимое оснащение испытательных стендов.

Цель формирования такой таблицы заключается в приведении различных видов ВЭМ, используемых на электроподвижном составе, к рациональному минимуму типоразмеров, марок, форм и т.п.

Использование принципа минимизации в технологическом процессе испытаний ВЭМ позволит значительно сократить объем подготовительных работ и повысить уровень их автоматизации путем учета серийности и группировки по основным параметрам. Это приведет к снижению номенклатуры запасных частей, удешевит ремонт машин, будет способствовать подбору необходимого испытательного оборудования, а также улучшит основные технико-экономические показатели сервисных локомотивных депо.

Сверх малой мощности (от 0,04 до 0,5 кВт)	Малой мощности (от 0,5 до 4 кВт)	Средней мощности (от 4 до 25 кВт)	Большой мощности (от 25 до 100 кВт)	Напряжения питания
Асинхронные				
–	АИР71А2	Усл № 548	НВА-55	380 В, 50 Гц
–	АЭВ71А2	АИР132М4	АС-81-6	
–	АТК80А4-УХЛ2	МАК160М6	АЭ-92-4	
–	АИР80В4-0М2	АО-63-2	АЭ-92-402	
–	АИР80А4-0М2	рДМ180М2	АНЭ225L4УХЛ2	
–	ДА100L4	рДМ112МВ2	НВА-55С	
–	–	рДМ180L4	рДМ180LB 40М5	
–	–	АЖВ180М2	АЭК200L6	
–	–	–	АП-82-4	
–	ДА112МВ402	4АЖ160М602	АЖ280А10У2	
–	–	АОС2-62-6	4АЖ225М602	
–	–	МВ11, МВ14	А2-82-6	
–	–	АТ160М602	АМВ-75-02	220 В, 50 Гц
–	АОМ 32-4	АЖВ180МА2	–	
–	АОМ 22-2	–	–	
Постоянного тока				
PL608000	П-41, П-41М	–	–	50 В
–	Х02-9578-03	–	–	
–	ДМК-1М/50УХЛ2	–	–	
–	МВ90L1	–	–	
–	SM2004L	–	–	
–	П22К-50У2	–	–	
П11, П11М	–	–	–	75 В
МВ-75	–	–	–	
ДВ-75У3	–	–	–	
TMN-06В	П-31, П-31М	ЭКТ-3, ЭКТ-5	ДПТ-37	110 В
–	П22К-110У2	П2К	2П2К, 2П2КМ	
–	–	П-51, П-51М	–	
–	–	П-72	–	
–	–	SM5001	–	220 В
–	–	5А2135/4	П-62, П-62М	
–	–	11А2135/4	–	
–	–	1А2732/4	–	
–	–	SM4003L	–	
–	–	2А2135/4	–	
–	–	6А2135/4	–	280 В
–	–	ЭТВ-20М3	–	
–	–	–	1АУ 2732/4	340 В
–	–	–	4ПНЖ200МА	
–	–	–	ПНЖ-200М	440 В
–	–	–	2ПН-200М	
–	–	–	1А2236/4	550 В/570 В
–	–	–	А2236/4	
–	ДК-408А	–	АУ 2236/4	1500 В
–	ДК-410	–	–	
–	–	ДК-409В	1А2839/4	3000 В
–	–	1А-3432/4	3А-3432/4	
–	–	6А-3432/4	8А-3432/4	
–	–	9А-3432/4	ТЛ-110М	
–	–	НБ431-П, НБ431А	ТЛ-110В	
–	–	НБ404А	–	
–	–	2А-3432/4	–	

Предложенный подход можно применить и к другим вспомогательным машинам ЭПС, например к вентиляторам.

Рассмотрим это на примере разработанного для Челябинского электровозоремонтного завода (одного из девяти локомотиворемонтных заводов, входящих в производственную базу «ЛокоТех») стенда, предназначенного, чтобы методом взаимной нагрузки проводить испытания по реализации режима нагревания при номинальных параметрах электрических машин НВА-55 в/и, АС-81-6, АЭ-92-4, АЭ-92-402, АНЭ225L4УХЛ2, рДМ180LB40М5, АЭК200L6, АП-82-4. Упрощенная силовая схема стенда представлена на рис. 2, параметры приведены в табл. 2 и 3.

Электромеханическое оборудование стенда обеспечивает проведение приемо-сдаточных испытаний ВЭМ до и после ремонта [8–10]. В процессе этих испытаний машины находятся под действием нагрузок различной интенсивности — от максимальных значений тока до значений, в несколько раз превышающих номинальное, по возможности близкое к реальным условиям эксплуатации. Такие режимы испытаний дают возможность определить проектную надежность ВЭМ, способность выдержать предельные значения нагрузки и, как следствие, дать оценку зародившимся дефектам [11].

Параметры испытательного стенда подбирались исходя из номинальных параметров приведенных выше электрических машин и параметров испытательных режимов (табл. 4) согласно [9, 10, 12, 13], ГОСТ 16264.0–85, ГОСТ 10159–79, ГОСТ 11828–86, ТУЗ2ЦВ868–77. Подбор заключался в определении близких по электрическим параметрам режимов испытаний и в выборе максимальных значений данных параметров.

Выводы

Проведенные исследования направлены на унификацию основного электромеханического оборудования испытательных стендов ВЭМ с целью сокращения времени его проектирования и изготовления.

Применение в технологическом процессе испытаний ВЭМ принципа минимизации даст возможность значительно снизить объем подготовительных работ, повысить уровень их автоматизации путем учета серийности и группировки оборудования по основным параметрам. Это приведет к снижению номенклатуры запасных частей, времени на проверку работоспособности до и после ремонта электрических машин, будет способствовать подбору необходимого испытательного оборудования и улучшит основные технико-экономические показатели сервисных локомотивных депо.

Кроме того, предложенные решения позволят сократить издержки при проектировании и создании стендов для испытания электрических машин.

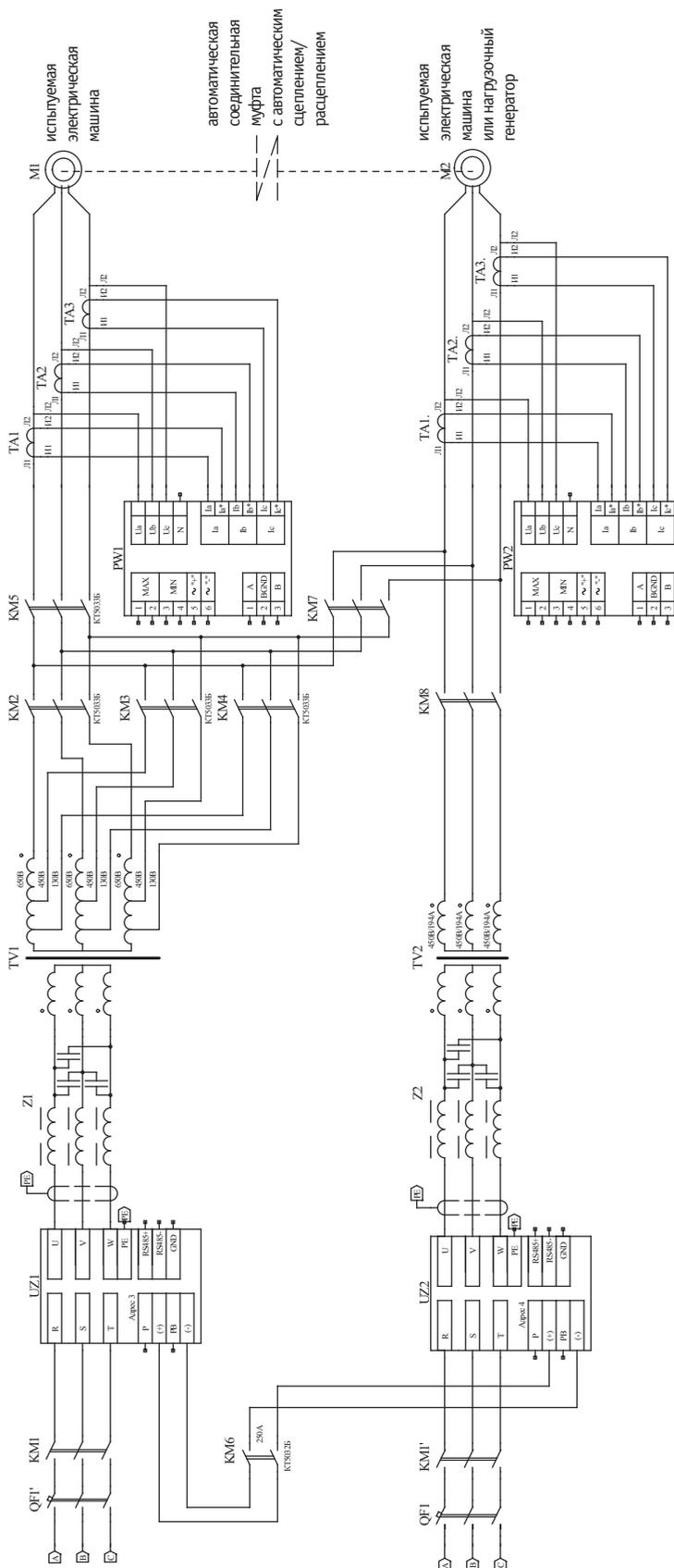


Рис. 2. Упрощенная схема испытательного стенда

Таблица 2

Регулируемые параметры унифицированного
стенда по испытаниям вспомогательных
электрических машин методом взаимной нагрузки

Параметр	Значение параметра	Допустимая относительная погрешность, %, не более
Напряжение переменного тока испытуемого двигателя в диапазоне, В	От 20 до 650	±1,5
Переменный ток испытуемого двигателя в диапазоне, А	От 10 до 180	±1,5
Поддержание частоты вращения приводного двигателя, об/мин	От 10 до 4500	±1,5

Таблица 3

Параметры электродвигателя,
контролируемые в процессе испытаний

Параметр	Значение параметра	Допустимая относительная погрешность измерения, %, не более	Допустимая абсолютная погрешность измерения, не более
Тестовое переменное напряжение, В	От 0 до 725	±1,5	–
Тестовый переменный ток, А	От 0 до 550	±1,5	–
Частота вращения, об/мин	От 0 до 4800	–	±5
Сопrotивление изоляции	От 100 кОм до 10 ГОм	±3,0	–
Температура обмоток и подшипников двигателя, °С	От 0 до 120	±5	–

Таблица 4

Пример подбора параметров испытательных режимов асинхронных ВЭМ

Контролируемый параметр, вид испытания	Тип электродвигателя				
	НВА-55	АНЭ225L4УХЛ2	АЭ-92–402	рДМ180LB4	
Номинальная мощность $P_{нв}$, кВт	55	55	40	30	
Номинальное напряжение $U_{нв}$, В	380	380	380	380	
Номинальный ток $I_{нв}$, А	120	119	90	66,8	
Коэффициент мощности $\cos \phi_{нв}$	0,77	0,8	0,79	0,77	
КПД $\eta_{нв}$, %	90,2	88	85,5	88,2	
Частота сети f , Гц	50	50	50	50	
Номинальная частота вращения $n_{нв}$, об/мин	1500	1430	1405 (1425)	1500	
Наибольшая частота вращения n_{max} , об/мин	1500	1430	1405 (1425)	1500	
1. Сопrotивление изоляции, МОм	Статор	100	100	40	
	Ротор				
2. Омическое сопротивление обмоток при +20 °С, Ом	Статор	0,0032–0,0037	0,0317–0,0388	0,0529–0,0622	0,006324–0,07276
3. Опыт холостого хода	Напряжение, В	380	380	380	394
	Ток, А	70	65	70	Нет данных
	Частота вращения, об/мин	1500	1500	1425	1960
4. Опыт короткого замыкания	Напряжение, В	100	100	100	100
	Ток, А	210–240	210–230	161–208	Номинальный
5. Испытание на нагрев	Время, ч	1	1	1	1 (ПВ 50 %, цикл 4 мин)
	Напряжение, В	380	380	380	394
	Ток, А	120	119	90	56
	Частота вращения, об/мин	1500	1430	1425	1960
6. Испытание на повышенную частоту вращения	Время, мин	2	2	2	2
	Частота вращения, об/мин	1800	1800	1800	2350
7. Испытание электрической прочности межвитковой изоляции якоря	Напряжение, В	570	570	570	730
	Время, мин	5	5	5	5
8. Испытание на кратковременную перегрузку по току (испытания на пуск)	Ток, А	180	180	135	Пятикратный пуск
	Время, мин	(2 мин)	(2 мин)	(2 мин)	
9. Измерение параметров вибрации	Виброскорость, мм/с	2,2	2,8	2,2	2,8
10. Сопrotивление изоляции, МОм	Статор	5	1,5	1	5
	Ротор	5	1,5	1	5
11. Испытание электрической прочности изоляции в течение 1 мин переменным током 50 Гц	Напряжение, В	1600 (СР) 2000 (КР)	1600 (СР) 2000 (КР)	—	2120 (КР) 2000 (СР)

Литература

1. Радин В. И., Брускин Д. А., Захорович А. Е. Электрические машины: Асинхронные машины / Под ред. И. П. Копылова. Москва : Высшая школа, 1988. 328 с.
2. ГОСТ 12139–84. Машины электрические вращающиеся. Ряды номинальных мощностей, напряжений и частот. Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. 6 с.
3. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва : Стандартинформ, 2006. 31 с.
4. Бублик В. В., Бублик А. В. Вспомогательные электрические машины электроподвижного состава и их классификация // Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т. 11. № 5. С. 104–111. eISSN 2222–0402.
5. Электродвигатели постоянного тока серии П и ДВ. Руководство по среднему и капитальному ремонту. ЦАРВ.050.49.00.000 РК.
6. Дубровский З. М., Попов В. И., Тушканов Б. А. Грузовые электровозы переменного тока : справочник. Москва : Транспорт, 1991. 471 с.
7. Скалин А. В., Бухтеев В. Ф., Кононов В. Е. Электрические машины и аккумуляторные батареи тепловозов (конструкция, ремонт и испытание). Москва : Желдориздат ; Трансинфо, 2005. 232 с.
8. Мотор-вентиляторы типа МВ-11, МВ-14. Программа и методика испытаний приемочных испытаний после проведения ремонта. ЦАРВ.085.55.00.000 ПМ.
9. ГОСТ 2582–2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 119 с.
10. Асинхронные электродвигатели АНЭ-225Л4УХЛ2, АЭ-92-4, НВА-55, НВА-22, 1,25ЭВ-2,8-6-3270У4. Руководство по среднему и капитальному ремонту. ЦАРВ.050.52.00.000 РК.
11. Щукин О. С. Испытание электрических машин. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. 123 с.
12. Электродвигатели асинхронные трехфазные. Программа и методика приемочных испытаний после проведения ремонта. ЦАРВ.059.06.00.000 ПМ.
13. ГОСТ Р 53472–2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Москва : Стандартинформ, 2011. 41 с.

Объем статьи 0,65 авторских листа

References

1. Radin V. I., Bruskin D. A., Zakhorovich A. E. Electrical machines: Induction machines [Elektricheskie mashiny: Asinkhronnye mashiny] / Ed. by I. P. Kopylov. Moscow : High school, 1988. 328 p.
2. GOST 12139–84. Electric rotary machines. Ranges of rated output, voltages and frequencies [Mashiny elektricheskie vrashhayushhiesya. Ryady nominal'nykh moshhnostey, napryazheniy i chastot]. Moscow, 1986. 6 p.
3. GOST 13109–97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems [Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshhego naznacheniya]. Moscow : Standardinform, 2006. 31 p.
4. Bublik V. V., Bublik A. V. Auxiliary electric machines of electric rolling stock and their classification [Vspomogatel'nye elektricheskie mashiny elektropodvizhnogo sostava i ikh klassifikatsiya] // Original research (ORIS). 2021. Vol. 11. No. 5. Pp. 104–111. eISSN 2222–0402.
5. Direct current electric motors of P and DV series. Manual on mid-life repair and overhaul. TsARV.050.49.00.000 RK [Elektrodvigateli postoyannogo toka serii P i DV. Rukovodstvo po srednemu i kapital'nomu remontu. TsARV.050.49.00.000 RK].
6. Dubrovskiy Z. M., Popov V. I., Tushkanov B. A. Alternating current freight electric locomotives [Gruzovye elektrovozy peremennogo toka] : handbook. Moscow : Transport, 1991. 471 p.
7. Skalin A. V., Bukhteev V. F., Kononov V. E. Electrical machines and accumulator batteries for diesel locomotives (design, repair and testing) [Elektricheskie mashiny i akkumulyatornye batarei teplovozov (konstruktsiya, remont i ispytanie)]. Moscow : Zheldorizdat ; Transinfo, 2005. 232 p.
8. Blower motors of MV-11 and MV-14 types. Program and method of acceptance tests after repair. TsARV.085.55.00.000 PM [Motor-ventilyatory tipa MV-11, MV-14. Programma i metodika ispytaniy priemochnykh ispytaniy posle provedeniya remonta. TsARV.085.55.00.000 PM].
9. GOST 2582–2013. Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. General technical specifications [Mashiny elektricheskie vrashhayushhiesya tyagovyye. Obshhie tekhnicheskyye usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 119 p.
10. Induction electric motors ANE-225L4UKhL2, AE-92-4, NVA-55, NVA-22, 1,25EV-2,8-6-3270U4. Manual on mid-life repair and overhaul. TsARV.050.52.00.000 RK [Asinkhronnye elektrodvigateli ANE-225L4UKhL2, AE-92-4, NVA-55, NVA-22, 1,25EV-2,8-6-3270U4. Rukovodstvo po srednemu i kapital'nomu remontu. TsARV.050.52.00.000 RK].
11. Shhukin O. S. Testing of electrical machines [Ispytanie elektricheskikh mashin]. Omsk : Publishing House of OmSTU, 2008. 123 p.
12. Three-phase induction electric motors. Program and method of acceptance tests after repair. TsARV.059.06.00.000 PM [Elektrodvigateli asinkhronnye trekhfaznyye. Programma i metodika priemochnykh ispytaniy posle provedeniya remonta. TsARV.059.06.00.000 PM].
13. GOST P 53472–2009. Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods [Mashiny elektricheskie vrashhayushhiesya. Dvigateli asinkhronnye. Metody ispytaniy]. Moscow : Standardinform, 2011. 41 p.

УДК 621.314.212:681.5

Борис Викторович Рожкин, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

НЕТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ДРОССЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОРОВ

Boris Viktorovich Rozhkin, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Inaccuracies of assessment of thermal modes for impedance bonds

Аннотация

Систематический перегрев и снижение уровня обслуживания дроссель-трансформаторов оказывают негативное влияние на пропускную способность участков железной дороги. Как правило, при расчете наличной пропускной способности проверяют допустимые режимы работы системы тягового электроснабжения, а тепловые режимы работы обратной тяговой сети не рассматривают. В такой проверке не учитывают график движения поездов — для расчетов используют средний ток поезда максимальной массы рассматриваемого графика. В статье на основе сравнения с результатами прямого расчета теплового баланса дроссель-трансформатора при движении поездов исследованы ошибки общепринятого метода.

Ключевые слова: дроссель-трансформатор, тепловой режим, расчет наличной пропускной способности, обратная тяговая сеть.

Summary

A systematic overheating and a decrease of a level of maintenance of impedance bonds negatively affect the capacity of railway sections. As a rule, at calculation of capacity only permissible operation modes are checked while thermal operation modes of a return traction system are not considered. Moreover, such a check doesn't consider a train schedule — at calculations an average current of a train with a maximum weight for a considered train schedule is used. In the paper the author studies mistakes of the generally accepted method on the basis of comparison with results of a direct calculation of an impedance bond thermal balance at train operation.

Keywords: impedance bond, thermal mode, calculation of capacity, return traction system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-41-45

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных задач, стоящих перед холдингом ОАО «РЖД», — обеспечить регулярное движение поездов массой 9000 т и более, что позволит повысить провозную способность железнодорожных линий и снизить требуемый эксплуатируемый парк локомотивов [1].

Особенность организации тяжеловесного движения в Российской Федерации заключается в отсутствии специальных линий. Грузовые поезда повышенной массы движутся по железнодорожной инфраструктуре общего пользования, изначально не рассчитанной на такие нагрузки. Кроме того, развитие тяжеловесного движения — вынужденная мера увеличения провозной способности участков с высокими параметрами загрузки, а отказы инфраструктурного комплекса приводят к снижению показателей эффективности железнодорожных линий. Поэтому перед началом обращения поездов повышенной массы на линиях производится усиление инфраструктуры, чтобы довести ее нагрузочную способность до требуемого уровня.

На основании прогнозного графика движения поездов выполняют комплекс расчетов по определению нагрузки на элементы инфраструктуры. В частности, для хозяйства тягового электроснабжения в соответствии с инструкцией [2] определяют:

наибольшие средние 2-, 5- и 15-минутные токи преобразователей тяговых подстанций постоянного тока;

наибольшие средние 1- и 10-минутные токи фазных обмоток трансформаторов и автотрансформаторов подстанций, температуры наиболее нагретой точки обмоток и температуры масла в верхних слоях;

минимальные средние 3-минутные значения напряжения на токоприемниках всех поездов;

наибольшие средние температуры нагрева проводов контактной сети в точках подключения фидеров подстанций за периоды 1, 3 и 20 мин.

Далее на основании полученных данных рассчитывают коэффициенты использования нагрузочной способности, значение больше 1 говорит о необходимости усиления элемента.

Не сложно заметить, что в приведенном перечне оборудования, для которого анализируются температурные режимы, отсутствует оборудование обратной тяговой сети, представленное перемычками, токопроводящими стыками и дроссель-трансформаторами.

ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ОПРЕДЕЛЕННЫХ МЕЖПОЕЗДНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Инструкция [2] предлагает косвенную проверку режимов работы оборудования обратной тяговой сети путем сравнения действующих значений обратных тяговых токов с максимально допустимыми значениями, полученными по результатам тепловых испытаний, проведенных ВНИИЖТом в 1980-х гг. [3, 4]. В ходе этих испытаний были определены действующие значения обратных тяговых токов, протекание которых не вызывает ненормативный нагрев масла дроссель-трансформатора. Для расчета действующего значения обратного тягового тока $I_{эф}$ инструкция [2] рекомендует пользоваться выражением

$$I_{эф} = \gamma K_{эф} K_{ср} K_{пр} I_0 \quad (1)$$

где $\gamma = 1$ для дроссель-трансформатора; $K_{эф}$, $K_{ср}$ — коэффициенты эффективного и среднего тока соответственно; $K_{пр}$ — коэффициент приведения тока к рельсам;

I_0 — действующий ток поезда наибольшей установленной массы, А.

Рассмотрим результат проверки графика движения пакета поездов массой 6300–9000–6300 т с межпоездным интервалом 10 мин по участку Хрустальная — Шаля.

Как предлагает инструкция [2], находим действующее значение тока, потребляемого электровозом поезда самой большой массы, на основании тяговых расчетов, выполненных в среде КОРТЭС, и всех коэффициентов для самого сложного перегона на участке. Численные значения приведены в системе

$$\begin{cases} I_0 = 2977,45 \text{ А} \\ K_{эф} = 1,015 \\ K_{ср} = 0,6 \\ K_{пр} = 0,95 \end{cases} \quad (2)$$

Подставив значения системы (2) в выражение (1), получим действующее значение тока в дроссель-трансформаторе, равное 1722,3 А, что меньше максимально допустимого 2200 А. Согласно инструкции [2], на этом этапе делается вывод о допустимости данного графика

движения поездов и о том, что его реализация не приведет к перегреву элементов обратной тяговой сети и не снизит надежность работы рельсовых цепей на участке.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СПОСОБ ПРОВЕРКИ МЕЖПОЕЗДНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Однако при современном уровне развития средств вычислительной техники не составляет труда выполнить более точные расчеты, основанные на конечно-элементных моделях, и точнее определить тепловой баланс дроссель-трансформатора. Например, в публикациях [5–8] предложены и конечно-элементные модели растекания тока в рельсовой линии, и модели теплового баланса дроссель-трансформатора на основе композиции простых тел.

В работе [6] определен дроссель-трансформатор, работающий в самых тяжелых условиях на рассматриваемом участке. Согласно тяговым расчетам, выполненным в среде КОРТЭС, время, в течение которого через этот дроссель-трансформатор будет протекать обратный тяговый ток, обусловленный движением поездов из пакета, составляет порядка 21 мин. Применив модель теплового баланса из публикации [8], построим график изменения температуры масла за указанное время приложения нагрузки (рис. 1а). На приведенном графике показан один очень важный момент: за 21 мин масло нагрелось на 8 °С, но за следующую 21 мин оно остыло всего на 1 °С, т.е. тепловой процесс в масляной ванне

инерционен, а это никак не учитывается в проверочных расчетах инструкции [2]. Предположим, что через 21 мин проедет еще один такой же поезд и температура масла также возрастет на 8 °С. Начальная температура в этом случае составит 7 °С, а максимальный перегрев 15 °С (рис. 1б). Исходя из данного факта можно сделать вывод, что инструкция [2] не учитывает инерционность тепловых процессов, происходящих в дроссель-трансформаторе.

Для уточнения проверочного расчета воспользуемся данными растекания тока в рельсовой линии участка, полученными при моделировании процесса. Графики тока среднего вывода дроссель-трансформатора, вычисленные расчетным путем, представлены на рис. 2, график измерения температуры масла при проходе пакета поездов — на рис. 3. Видно, что за время прохода пакета поездов температура масла увеличилась на 40 °С: сама по себе эта величина малоинформативна, так как не учитывает график движения поездов в целом.

Предположим, движение поездов осуществляется в соответствии с графиком, представленным на рис. 4. Пакет из трех поездов идет по участку с часовым интервалом, за который элементы прямой нитки системы тягового электрооборудования остывают до исходной температуры, т.е. работают в установившемся тепловом режиме. Чтобы ответить на вопрос, работает ли в установившемся тепловом режиме обратная тяговая нитка, построим график измерения температуры масла при движении поездов и оценим его форму (рис. 5).

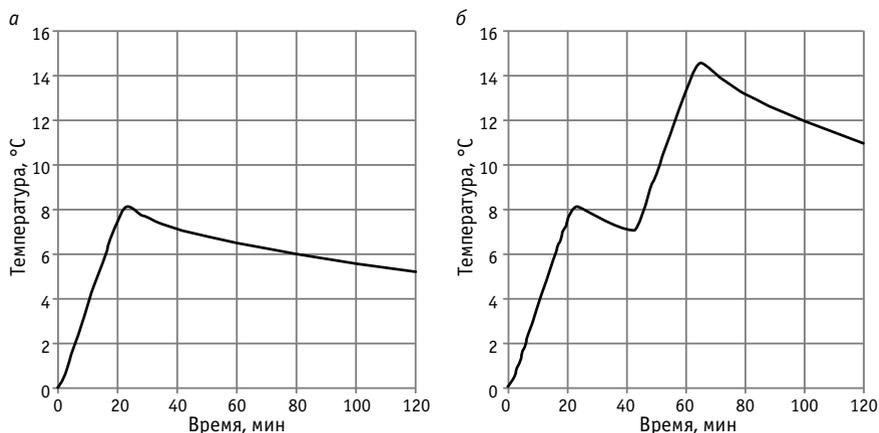


Рис. 1. График превышения температуры масла над температурой охлаждающей среды при проходе одного (а) и двух (б) поездов

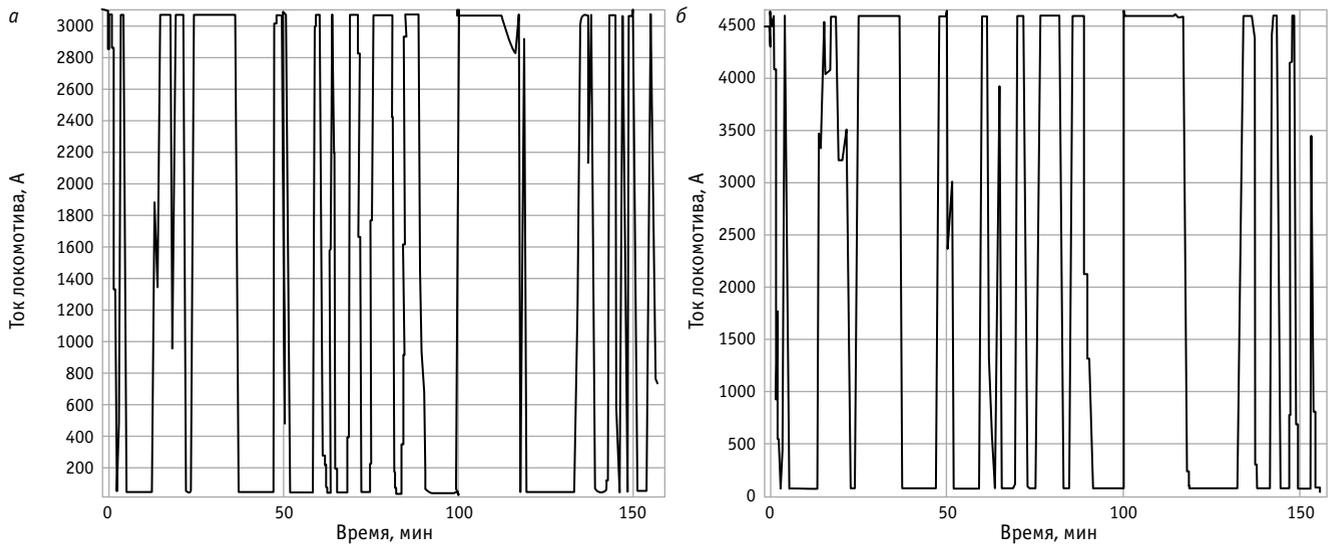


Рис. 2. Обратные тяговые токи дроссель-трансформатора при проходе поездов массой 6300 т (а) и 9000 т (б)

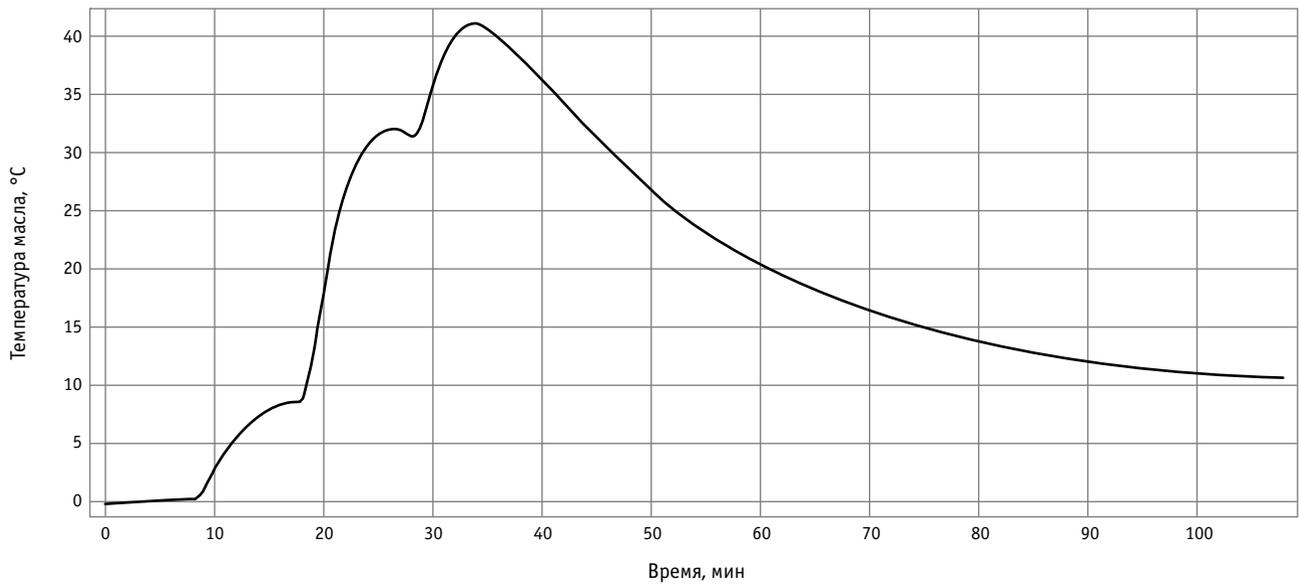


Рис. 3. Нагрев масла при проходе пакета из трех поездов с 10-минутным интервалом

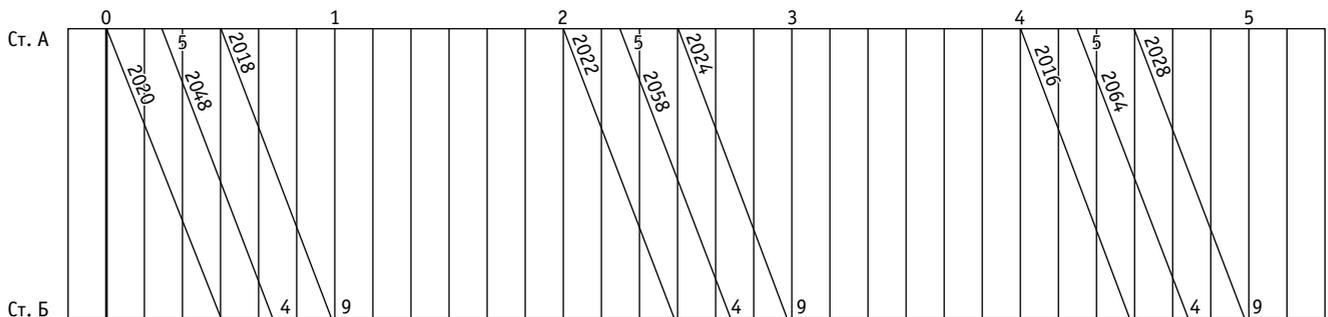


Рис. 4. График движения поездов

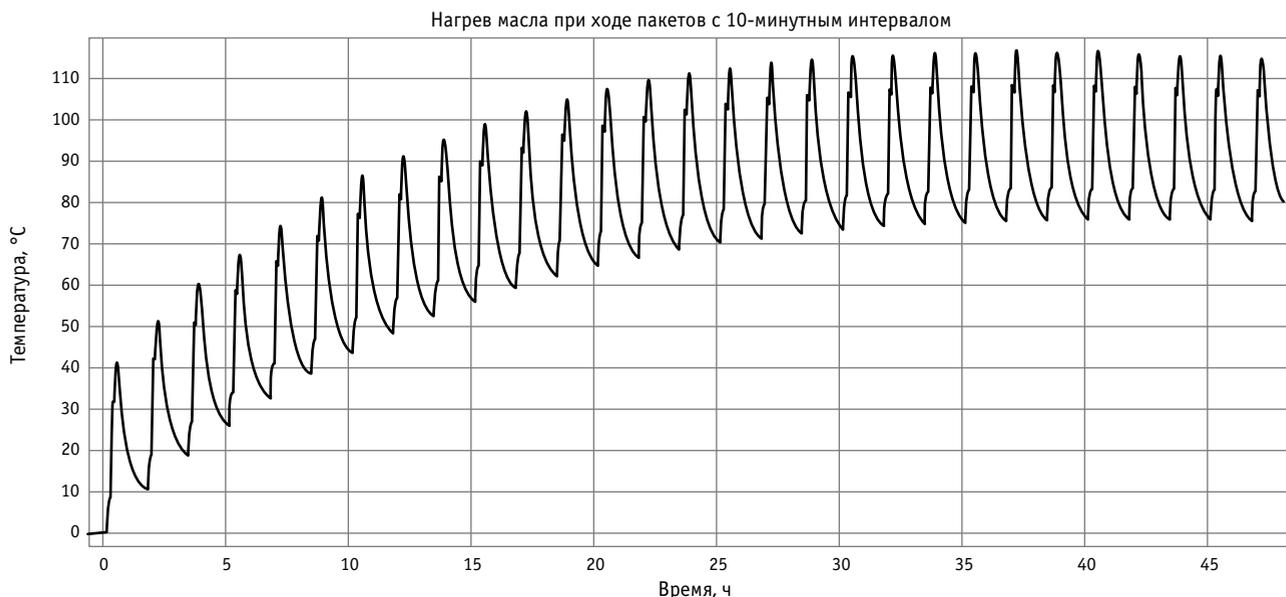


Рис. 5. Измерение температуры масла при реализации графика движения поездов

Рис. 3 и 5 показывают, что самый нагруженный дроссель-трансформатор участка не успевает остывать до первоначальной температуры. После прохода 20 пакетов поездов можно говорить о прекращении роста максимальных температур перегрева масла и о стабилизации температурного режима работы. При этом перегрев масла дроссель-трансформатора над окружающим воздухом находится в диапазоне от 75 до 110 °С, что нарушает нормативные параметры, приведенные в справочнике на аппаратуру систем автоматики и телемеханики [9].

С точки зрения устойчивости работы дроссель-трансформатора в долгосрочной перспективе необходимо, чтобы в результате испарения объем масла не уменьшался. Испарение масла начинается при достижении критической температуры, называемой температурой вспышки, которая для трансформаторного масла лежит в диапазоне 120–135 °С.

Если график движения поездов (см. рис. 4) будет реализовываться при температуре окружающего воздуха не более 10 °С, то можно сказать, что в этих условиях дроссель-трансфор-

матор справится с тепловой нагрузкой, так как не будет достигнута температура вспышки и не начнется процесс испарения. Если температура окружающего воздуха превысит 10 °С, начнется испарение масла, что в конечном счете приведет к снижению надежности работы дроссель-трансформатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечить устойчивое движение поездопотока возможно только при безотказной работе всего инфраструктурного комплекса. Для этих целей разрабатываются программные средства, позволяющие определять лимитирующие элементы инфраструктуры и проводить их усиление. Тем не менее, для оценки нагрузки на элементы обратной тяговой сети используется метод, не учитывающий ряд важных факторов, таких как инерционность тепловых процессов и график движения поездов. Альтернативный метод, представленный в данной статье, посвящен переходу к прямым оценкам температуры элементов обратной тяговой сети, как это уже делается для остальных узлов системы тягового электроснабжения.

Литература

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). Москва : ОАО «РЖД», 2015. 98 с.
2. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. Москва : ОАО «РЖД», 2010. 350 с.
3. Котельников А. В., Наумов А. В. Особенности работы дроссель-трансформаторов в условиях обращения тяжеловесных поездов // Автоматика, телемеханика и связь. 1980. № 11. С. 8–12. ISSN 0005–2329.

References

1. The strategy of scientific and technological development of the holding «RZD» for the period until 2025 and for the long term until 2030 (The White Book) [Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)]. Moscow : JSC «RZD», 2015. 98 p.
2. Instruction on calculation railways capacity [Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznnykh dorog]. Moscow : JSC «Russian Railways», 2010. 350 p.
3. Kotelnikov A. V., Naumov A. V. Features of operation of impedance bonds in conditions of heavy traffic [Osobennosti raboty drossel'-transformatorov v usloviyakh obrashheniya tyazhelovesnykh poezdov] // Automation, communication and informatics. 1980. No. 11. Pp. 8–12. ISSN 0005–2329.

4. Котельников А. В., Наумов А. В. Обратная тяговая сеть переменного тока при пропуске поездов повышенной массы // Автоматика, телемеханика и связь. 1983. № 4. С. 5–8. ISSN 0005–2329.
5. Рожкин Б. В., Паранин А. В. Анализ условий работы рельсовой линии на основе моделирования растекания обратного тягового тока // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 28–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34. ISSN 1815–9400.
6. Лесников Д. В. Совершенствование методики расчета протяженных заземлителей на участках постоянного тока // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 71–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-71-76. ISSN 1815–9400.
7. Лесников Д. В., Паранин А. В. О подходе к расчету электрического сопротивления железобетонных конструкций // Известия Транссиба. 2017. № 3. С. 102–114. ISSN 2220–4245.
8. Бушуев С. В., Рожкин Б. В. Теплофизический расчет дроссель-трансформатора // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 6. С. 45–54. ISSN 1997–0722.
9. Сороко В. И., Милюков В. А. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник. Кн. 1. Москва : НПФ «ПЛАНЕТА», 2000. 960 с.

4. Kotelnikov A. V., Naumov A. V. Alternating current traction system in conditions of heavy traffic [Obratnaya tyagovaya set' peremennogo toka pri propuske poezdov povyshennoy massy] // Automation, communication and informatics. 1983. No. 4. Pp. 5–8. ISSN 0005–2329.
5. Rozhkin B. V., Paranin A. V. Analysis of rail track operation conditions on the basis of modeling return traction current spreading [Analiz usloviy raboty rel'sovoy linii na osnove modelirovaniya rastekaniya obratnogo tyagovogo toka] // Transport of the Urals. 2018. No. 4 (59). Pp. 28–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34. ISSN 1815–9400.
6. Lesnikov D. V. Improvement of the method of the calculation of expedited grounders in the stations of a constant current [Sovershenstvovanie metodiki rascheta protyazhennykh zazemliteley na uchastkakh postoyannogo toka] // Transport of the Urals. 2017. No. 1 (52). Pp. 71–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-71-76. ISSN 1815–9400.
7. Lesnikov D. V., Paranin A. V. About approach to valuation of reinforced concrete structures electrical resistance [O podkhode k raschetu elektricheskogo soprotivleniya zhelezobetonnykh konstruksiy] // Journal of Transsib Railway Studies. 2017. No. 3. Pp. 102–114. ISSN 2220–4245.
8. Bushuev S. V., Rozhkin B. V. Thermophysical calculation of the choke-transformer [Teplofizicheskiy raschet drossel'-transformatora] // Bulletin of transport of the Volga region. 2018. No. 6. Pp. 45–54. ISSN 1997–0722.
9. Soroko V. I., Milyukov V. A. Equipment of railway automation and telemechanics [Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki] : handbook. Book. 1. Moscow : PLANET, 2000. 960 p.

Объем статьи 0,55 авторских листа

УДК 625.1

Борис Эйнихович Глюзберг, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс» АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,

Алексей Алексеевич Локтев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Александр Владимирович Савин, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Ирина Викторовна Шишкина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Михаил Евгеньевич Березовский, аспирант Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

МЕТОД РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ИНТЕНСИВНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Boris Eynikhovich Glyuzberg, DSc in Engineering, Professor, Head of laboratory of Scientific Centre Track Infrastructure and Issues of Wheel-Rail Interaction, JSC VNIIZhT, Moscow, Russia,

Alexey Alexeevich Loktev, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Alexander Vladimirovich Savin, DSc in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Irina Viktorovna Shishkina, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Mikhail Evgenyevich Berezovskiy, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Method for calculation of required strength of railway track with the consideration for intensity of its use

Аннотация

Прочность железнодорожного пути определяется прочностью и распределяющей способностью несущих элементов (рельсов, подкладок, шпал, балласта и земляного полотна). Чем выше прочность материала, из которого изготовлены несущие элементы железнодорожного пути, или чем лучше распределяющая способность вышележащих элементов (рельсов, шпал, подкладок, балласта), тем выше прочность пути при прочих равных условиях. В статье представлен новый метод расчета необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования. Необходимая распределяющая способность рельсов определяется исходя из выполнения условий прочности для шпал, балласта и земляного полотна. В соответствии с правилами расчета железнодорожного пути на прочность значения от воздействия колес проходящего подвижного состава рассчитывают в одном (расчетном) сечении пути. При этом статистические свойства, характеризующие коэффициентом изменчивости, определяются различием воздействия на путь в расчетном сечении разных колес проходящего подвижного состава. С помощью системы уравнений можно найти необходимую прочность железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсы, шпалы, балласт, методика расчета, система уравнений.

Summary

Strength of a railway track is determined by strength and a distributing ability of bearing elements (rails, plates, sleepers, ballast and subgrade). All things being equal, the higher the strength of the material for bearing elements of a railway track or the better the distributing ability of elements (rails, sleepers, plates, ballast), the higher the strength of a railway track. The paper presents a new method for calculation of the required strength of a railway track with the consideration for the intensity of its use. The required distributing ability of rails is determined based on the fulfilment of strength conditions for sleepers, ballast and subgrade. According to rules of the strength calculation of a railway track, values of influence of rolling stock wheels are calculated in one (calculated) cross section of a railway track. Meanwhile, statistical properties that are characterized by a variation coefficient are determined by various influences on a track in the calculated cross section of different wheels of rolling stock. With the use of a system of equations it is possible to calculate the required strength of the railway track with the consideration for the intensity of its use.

Keywords: railway track, rails, sleepers, ballast, calculation method, system of equations.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-46-52

Практически все задачи, решаемые при расчетах железнодорожного пути на прочность, имеют в основном две цели: проверку возможности безопасного (с точки зрения прочности пути) пропуска заданного подвижного состава с заданной скоростью или определение необходимой прочности железнодорожного пути для безопасного пропуска заданного подвижного состава с заданной скоростью; определение необходимой прочности пути (с учетом интенсивности его использования) для создания нормальных условий эксплуатации железных дорог при безусловном обеспечении безопасности движения поездов с установленной скоростью.

При этом понятие «нормальные условия эксплуатации» включает широкий круг ограничений, связанных с техническими, организационными и экономическими проблемами системы контроля, ремонта и содержания железнодорожного пути в исправном состоянии, обеспечивающем бесперебойную работу транспорта. Для создания нормальных условий эксплуатации необходимо учитывать, что чем выше грузонапряженность, тем более прочным должен быть путь, т.е. тем большими должны быть межремонтные периоды, так как потери от выделения и передержек «окон» с увеличением грузонапряженности резко возрастают, а производительность труда путейцев (по физическому объему выполняемых ремонтных работ) снижается, особенно при текущем содержании железнодорожного пути.

Первой цели удовлетворяют правила расчета железнодорожного пути на прочность, где в качестве критерия прочности принято максимальное (заданного уровня вероятности) допускаемое напряжение в элементах пути или максимальное (заданного уровня вероятности) допускаемое давление на них как однокомпонентная константа. При этом прочность оценивается системой детерминистических неравенств по однопараметрическим критериям прочности $[\sigma_k]$, $[\sigma_{ш}]$, $[\sigma_6]$ и $[\sigma_3]$; левые же члены неравенств рассчитываются с помощью статистических методов как максимальные величины напряжений σ_k , $\sigma_{ш}$, σ_6 и σ_3 заданного уровня вероятности:

$$\begin{aligned} \sigma_k &\leq [\sigma_k]; \quad \sigma_{ш} \leq [\sigma_{ш}]; \\ \sigma_6 &\leq [\sigma_6]; \quad \sigma_3 \leq [\sigma_3], \end{aligned} \quad (1)$$

где индексы обозначают: «к» — в кромке подошвы рельса (для краевых изгибных напряжений); «ш» — в шпалах под подкладками (для нормальных напряжений сжатия, осредненных по опорной площади подкладки); «б» — в балласте под шпалами в подрельсовой зоне (для нормальных напряжений сжатия, осредненных по ширине шпалы) и «з» — на основной площадке земляного полотна по вертикали, проходящей через пересечения оси рельса с осями шпал (для нормальных напряжений сжатия).

Важнейшие принципы нового метода расчета, предназначенного для решения задач, преследующих не только первую, но и вторую цель, сформулированы на кафедре «Транспортное строительство» РУТ (МИИТ) [1–3]. Исходя из этих принципов и для развития кафедрой «Транспортное строительство» РУТ (МИИТ) выполнен ряд научно-исследовательских работ [4–6], в которых даны основы данного метода:

$$\begin{aligned} h_p &= \varphi(\sigma_p; T); \quad h_6 = \varphi(\sigma_6; T); \\ h_{ш} &= \varphi(\sigma_{ш}; T); \quad h_3 = \varphi(\sigma_3; T). \end{aligned} \quad (2)$$

При этом h_6 и h_3 — непрерывные функции, поскольку мерой повреждения балласта под шпалой h_6 и основной площадки земляного полотна в подрельсовых зонах h_3 являются накопленные в указанных местах остаточные деформации. Что касается функций h_p и $h_{ш}$, то они могут быть непрерывными, если в качестве меры повреждения принят износ рельсов и шпал или размер усталостных дефектов в них, и дискретными, если в качестве меры повреждения принят выход из строя этих элементов.

С помощью выражений (2) можно решать широкий круг вариантов стохастических задач на технико-экономической основе. Однако во многих случаях, в том числе и при определении необходимой прочности железнодорожного пути для заданных условий эксплуатации, удобнее пользоваться нормативными, а не технико-экономическими приемами расчетов, накладывая определенные ограничения (нормы) на некоторые расчетные параметры. Очевидно, что в выражениях (2) такое ограничение необходимо для функции h . При этом система статистических равенств (2) превращается в новое условие прочности, которое выражается системой детерминистических неравенств

$$\left. \begin{aligned} h_p &= \varphi(\sigma_p; T) \leq [h_p]; \\ h_{ш} &= \varphi(\sigma_{ш}; T) \leq [h_{ш}]; \\ h_6 &= \varphi(\sigma_6; T) \leq [h_6]; \\ h_3 &= \varphi(\sigma_3; T) \leq [h_3]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Эта система уравнений является по существу основой методики расчета необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования. Доведение ее до итоговых формул, пригодных для практических расчетов, состоит в определении двухпараметрической функции $h = \varphi(\sigma; T)$ для всех несущих элементов железнодорожного пути с учетом стохастичности h и σ . Длительные и многочисленные наблюдения за накоплением деформаций, износа и повреждений элементов пути (в том числе и их выхода из строя) при различных величинах поездных нагрузок показывают, что сложную функцию $h = \varphi(\sigma; T)$ можно заменить произведением двух простых функций [7–10]

$$h_{cp} = h_{\sigma_1} h_T \quad (4)$$

где h_{σ_1} — величина накопленных повреждений рассчитываемого элемента железнодорожного пути в зависимости от T при $\sigma = \sigma_1 = \text{const}$,

$$h_{\sigma_1} = \varphi_{\sigma_1}(T); \quad (5)$$

h_T — относительная величина накопленных повреждений в зависимости от σ при $T = T_n = \text{const}$, т.е. отношение величины накопленных повреждений за период пропуска $T = T_n$ млн т брутто груза при текущем значении σ к величине накопленных повреждений за тот же период при $\sigma = \sigma_1$.

Естественно, что при любом T , если $\sigma = \sigma_1$, то $h_T = 1$ (рис. 1). Экспериментально установлено, что фактическая зависимость относительных накопленных (за заданный период) средних повреждений h_T от эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ для всех несущих элементов железнодорожного пути может быть аппроксимирована с достаточной для практических расчетов точностью функцией вида [11–13]

$$h_T = \alpha \sigma_{\text{ЭКВ}}^n \quad (\text{если } \sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_{\text{ЭКВ}1}, \text{ то } h_T = 1), \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{ЭКВ}} = \gamma \sigma_{\text{ср}}$;

α и n — коэффициенты аппроксимации (положительные константы).

Явное выражение функции $h_{\sigma_1} = \varphi_{\sigma_1}(T)$ для разных элементов железнодорожного пути и для разных видов повреждений может быть различно в зависимости от принятого в качестве оценочной меры вида повреждения (остаточные деформации, износ, усталостные трещины, выход из строя и т.п.).

В металлических элементах железнодорожного пути повреждения проявляются в основном виде накопления усталостных трещин и частично износов. С использованием экспериментальных данных о выходе таких элементов из строя в зависимости от пропущенного тоннажа можно с достаточной для практических расчетов точностью принять в качестве аппроксимирующей функции $h_{\sigma_1} = \varphi_{\sigma_1}(T)$ одночленную параболу вида (рис. 2, кривая 1)

$$h_{\sigma_1} = \alpha_1 T^{n_1}, \quad (n_1 > 1), \quad (7)$$

где α_1 и n_1 — коэффициенты аппроксимации (положительные константы), определяемые при аппроксимации экспериментальной зависимости $h_{\sigma_1} = \varphi_{\sigma_1}(T)$ функцией (7).

Мерой накопленных повреждений балластного слоя и основной площадки земляного полотна является накопленная или остаточная деформация. При этом накопление деформаций происходит, как правило, вследствие переупаковки [6, 7], а также износа частиц при многократном действии нагрузки и с достаточной для практических расчетов точностью описывается уравнением вида (рис. 2, кривая 2)

$$h_{\sigma_1} = \frac{T}{bT + d}, \quad (8)$$

где b и d — положительные константы аппроксимации, определяются при аппроксимации экспериментальной зависимости $h_{\sigma_1} = \varphi_{\sigma_1}(T)$ функцией (8) [8, 9].

Засорение балласта возрастает с увеличением пропущенного тоннажа, а интенсивность накопления деформаций балластного слоя возрастает по мере засорения последнего. Поэтому уравнение накопления деформаций в балластном слое на засоряемых участках при $\sigma = \sigma_1 = \text{const}$ можно представить как сумму двух функций

$$h_{\sigma_1} = \frac{T}{b_1T + d_1} + \alpha_2 T^{n_2}. \quad (9)$$

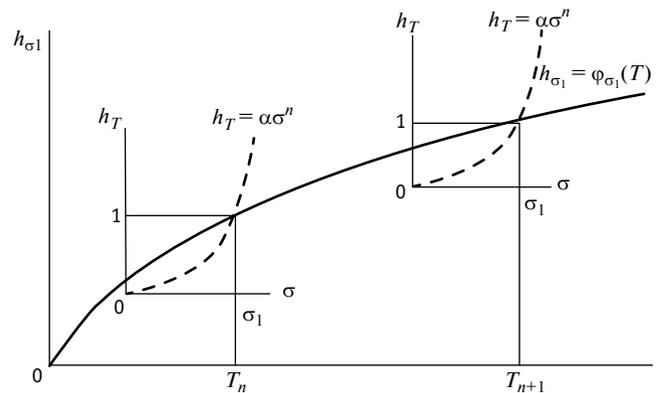


Рис. 1. Общий вид функции $h = h_{\sigma_1} h_T$

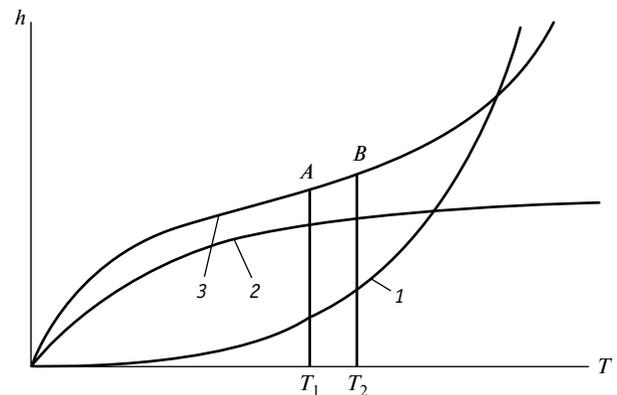


Рис. 2. Типичный вид графиков функции $h_{\sigma_1} = \varphi_{\sigma_1}(T)$ для металлических элементов железнодорожного пути (1), основной площадки земляного полотна и балластного слоя на незасоряемых участках (2), шпал и балластного слоя на засоряемых участках (3)

Первая из них характеризует процесс переупаковки частиц при неизменных коэффициентах трения между ними и зацеплениями, вторая — интенсификацию указанного процесса вследствие постепенного уменьшения коэффициента трения между частицами и их зацепления из-за засорения балласта и аккумуляции в нем влаги [10, 11].

На засоряемых участках значения констант b_1, d_1, α_2 и n_2 определяются аппроксимацией экспериментальной зависимости $h_{\sigma_1} = \varphi_{\sigma_1}(T)$ функцией (9). Общий вид графика функции (9) показан на рис. 2 (кривая 3).

Дефектность шпал характеризуется в основном накоплением в них количества повреждений.

Интенсивность же накопления дефектов в шпалах в значительной мере определяется сроком их эксплуатации в железнодорожном пути, т.е. накопленные дефекты на участках с одинаковым пропущенным тоннажем, но при разном времени эксплуатации шпал с момента их укладки — разные при прочих равных условиях [12, 13]. Объясняется это тем, что прочность шпал в зонах рельсовых подкладок изменяется во времени. Массовое обследование на десяти дорогах сети показало, что за первые годы эксплуатации шпал после укладки интенсивность накопления дефектов несколько снижается



из-за уплотнения, а следовательно, и упрочнения, но в дальнейшем постепенно возрастает вследствие «старения» шпалы, образования множества трещин между годичными слоями под концами подкладок и у прикрепителей. При этом установлено, что накопление дефектов в шпалах при $\sigma = \sigma_1 = \text{const}$ с достаточной для практических расчетов точностью описывается следующим уравнением:

$$h_{\sigma_1} = \alpha_3 TK_t K, \quad (10)$$

где α_3 — коэффициент пропорциональности между h_{σ_1} и T , численно равный средней интенсивности накопления углублений в шпалах в течение шестого года их эксплуатации;

K — коэффициент, учитывающий влияние на h_{σ_1} различных факторов, не связанных с $\sigma_{\text{шр}}$

$$K_t = 1 + 0,01(t - 6)^2, \text{ при } t \leq 6 \text{ лет } K_t = 1; \quad (11)$$

t — время, лет.

В условии прочности h есть максимальная величина заданного уровня вероятности. Связь максимальной величины со средней определяется выражением

$$h = \lambda h_{\text{ср}} \quad (12)$$

где λ — переходная функция от средних значений $h_{\text{ср}}$ к максимальным значениям заданного уровня вероятности. Для ее определения необходимо знать закон распределения вероятностей значений h .

Строго говоря, функции $\sigma(x)$ и $h(x)$ по координате железнодорожного пути x являются случайными и взаимно коррелированными. Для анализа их связи может быть использована теория случайных процессов. Однако при этом возникают непреодолимые в настоящее время трудности: невозможно выделить в изменчивости h роль изменчивости σ по протяжению железнодорожного пути, а также изменчивости физико-механических (прочностных) характеристик элементов пути по его протяжению [14, 15].

Согласно правилам расчета железнодорожного пути на прочность, значения σ от воздействия колес проходящего подвижного состава вычисляют в одном (расчетном) сечении пути. При этом статистические свойства, характеризующие коэффициентом изменчивости C_σ , обусловлены различием воздействия разных колес проходящего подвижного состава на путь в расчетном сечении. Значение коэффициента C_σ определяется по формуле

$$C_\sigma = \frac{S_P}{P_{\text{ср}}}, \quad (13)$$

где S_P — среднее квадратическое отклонение значений вертикальных динамических сил воздействия колес подвижного состава на путь в расчетном сечении, кГ;

$P_{\text{ср}}$ — среднее значение вертикальных динамических сил воздействия колес подвижного состава на путь в расчетном сечении, кГ.

Значение же h в одном (расчетном) сечении железнодорожного пути является величиной фиксированной (достоверной). Ее изменчивость, характеризуемая коэффициентом изменчивости C_h , определяется различием h в разных сечениях пути, т.е. изменчивостью по его протяжению. Причем основная причина изменчивости — различие физико-механических характеристик элементов железнодорожного пути по его протяжению.

Значение коэффициента C_h определяется по формуле

$$C_h = \frac{S_h}{h_{\text{ср}}}, \quad (14)$$

где S_h — среднее квадратическое отклонение значений меры повреждения рассчитываемого элемента в различных сечениях железнодорожного пути по его протяжению;

$h_{\text{ср}}$ — среднее значение меры повреждения рассчитываемого элемента пути.

При таком в известной мере условном разделении функций изменчивости они стохастически независимы. Поэтому значения σ и h любого уровня вероятности можно определять по формулам:

$$\sigma = \lambda_\sigma \sigma_{\text{ср}} \text{ и } h = \lambda_h h_{\text{ср}}, \quad (15)$$

$$\text{где } \lambda_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{ср}}} = 1 + \psi_\sigma C_\sigma \text{ и } \lambda_h = \frac{h}{h_{\text{ср}}} = 1 + \psi_h C_h, \quad (16)$$

здесь ψ_σ и ψ_h — безразмерные коэффициенты перехода от наиболее вероятных значений σ и h к значениям заданного уровня вероятности.

При $\psi_\sigma = 0$ и $\psi_h = 0$ соответственно $\sigma = \sigma_{\text{ср}}$ и $h = h_{\text{ср}}$. При других значениях ψ_σ и ψ_h вероятность неперевышения фактическими величинами σ и h их расчетных значений определяется с помощью интегральных функций распределения вероятностей σ и h в зависимости от ψ_σ и ψ_h .

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что распределение вероятностей σ в одном (расчетном) сечении железнодорожного пути обычно достаточно близко соответствует нормальному закону.

Распределение вероятностей h в большинстве случаев тоже хорошо выравняется нормальным законом, хотя, строго говоря, для выравнивания экспериментальных распределений повреждений по усталости или по износу больше подходит логарифмически нормальное распределение или распределение Максвелла.

При нормальном законе распределения вероятностей σ и h интегральные функции распределения, связывающие вероятность неперевышения значений σ и h с ψ_σ и ψ_h , имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \Phi^*(\sigma) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\psi_\sigma} \exp\left(-\frac{\psi_\sigma^2}{2}\right) d\psi_\sigma; \\ \Phi^*(h) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\psi_h} \exp\left(-\frac{\psi_h^2}{2}\right) d\psi_h \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

а дифференциальные функции распределения вероятностей значений σ (во времени) и h (по протяжению железнодорожного пути) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} p(\sigma) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\psi_\sigma^2}{2}\right); \\ p(h) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\psi_h^2}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где $p(\sigma)$ и $p(h)$ — плотность вероятности соответственно значений σ (распределение во времени) и h (распределение по протяжению железнодорожного пути);

$$\psi_\sigma = \frac{1}{C_\sigma} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{ср}}} - 1 \right) \quad \text{и} \quad \psi_h = \frac{1}{C_h} \left(\frac{h}{h_{\text{ср}}} - 1 \right). \quad (19)$$

При этом вероятность превышения (в процентах) фактическими величинами σ и h их расчетных значений определяется следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} n_\sigma &= 100[1 - \Phi^*(\sigma)]; \\ n_h &= 100[1 - \Phi^*(h)] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Так как основной учетной характеристикой интенсивности использования железнодорожного пути, в соответствии с которой распределяют по участкам денежные и материальные средства на его ремонт и обновление, является грузонапряженность, то и в условии прочности целесообразно заменить T его выражением из:

$$T = \Gamma \cdot t, \quad (21)$$

где Γ — грузонапряженность брутто, млн ткм на 1 км развернутой длины в год, создаваемая всеми поездами;

t — время эксплуатации рассчитываемого элемента железнодорожного пути, лет.

Учитывая сказанное, используя выражения для h_{σ_1} и h_T и подставляя выражение $h_{\text{ср}}$, получим систему уравнений условия прочности в итоговом явном виде:

$$\left. \begin{aligned} h_p &= \alpha_p \alpha_1 \gamma_p^{n_p} \sigma_{\text{р.ср}}^{n_p} \Gamma^{n_1} t^{n_1} (1 + \psi_{h_p} C_{h_p}) \leq [h_p]; \\ h_{\text{ш}} &= \alpha_{\text{ш}} \alpha_3 \gamma_{\text{ш}}^{n_{\text{ш}}} \sigma_{\text{ш.ср}}^{n_{\text{ш}}} K \Gamma t (1 + \psi_{h_{\text{ш}}} C_{h_{\text{ш}}}) \times \\ &\times [1 + 0,01(t-6)^2] \leq [h_{\text{ш}}]; \\ h_6 &= \alpha_6 \gamma_6^{n_6} \sigma_{6.\text{ср}}^{n_6} (1 + \psi_{h_6} C_{h_6}) \left(\frac{\Gamma t}{b_1 \Gamma t + d_1} + \alpha_2 \Gamma^{n_2} t^{n_2} \right) \leq [h_6]; \\ h_3 &= \alpha_3 \gamma_3^{n_3} \sigma_{3.\text{ср}}^{n_3} (1 + \psi_{h_3} C_{h_3}) \frac{\Gamma t}{b_1 \Gamma t + d} \leq [h_3] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Для того чтобы можно было получать по уравнениям (22) однозначное решение (ответ) о том, удовлетворяет рассчиты-

ваемый элемент необходимой прочности исходя из требования обеспечения нормальных условий эксплуатации или не удовлетворяет, нужно наложить еще ограничения на параметры t и ψ_h . То есть иметь норматив $[t]$, характеризующий заданный срок службы в данных условиях эксплуатации, и норматив $[\psi_h]$, характеризующий допускаемый процент превышения фактическими величинами накопленных повреждений за установленный срок службы $[t]$ допускаемой величины $[h]$. Если в качестве меры повреждения принят выход элементов из строя, то $[\psi_h]$ характеризует допускаемый процент выхода за заданный срок службы. Если же мерой повреждения являются накопленные деформации, то $[\psi_h]$ характеризует допускаемый процент протяжения железнодорожного пути, на котором накопленные деформации за установленный срок службы $[t]$ могут превысить допускаемую величину $[h]$.

Учитывая сказанное, заменив неравенства (22) равенствами, решив их относительно $\sigma_{\text{ср}}$ и подставив выражения для $\sigma_{\text{ср}}$ в (15), получим систему уравнений, выражающих допускаемые напряжения (заданного уровня вероятности) в несущих элементах железнодорожного пути, исходя из наложенных ограничений на $[h]$, $[t]$ и $[\psi_h]$, т.е. исходя из требования обеспечения нормальных условий эксплуатации железных дорог:

$$\left. \begin{aligned} [\sigma_p] &= \frac{1 + \psi_\sigma C_\sigma n_p}{\gamma_p} \sqrt{\frac{[h_p]}{\alpha_1 \alpha_p \Gamma^{n_1} t^{n_1} (1 + [\psi_{h_p}] C_{h_p})}}; \\ [\sigma_{\text{ш}}] &= \frac{1 + \psi_\sigma C_\sigma n_{\text{ш}}}{\gamma_{\text{ш}}} \sqrt{\frac{[h_{\text{ш}}]}{\alpha_3 \alpha_{\text{ш}} K \Gamma t (1 + [\psi_{h_{\text{ш}}}] C_{h_{\text{ш}}}) [1 + 0,01(t-6)^2]}}; \\ [\sigma_6] &= \frac{1 + \psi_\sigma C_\sigma n_6}{\gamma_6} \sqrt{\frac{[h_6] (b \Gamma t + d)}{\alpha_6 (1 + [\psi_{h_6}] C_{h_6}) [\Gamma t + \alpha_2 \Gamma^{n_2} t^{n_2} (b_1 \Gamma t + d_1)]}}; \\ [\sigma_3] &= \frac{1 + \psi_\sigma C_\sigma n_3}{\gamma_3} \sqrt{\frac{[h_3] (b \Gamma t + d)}{\alpha_3 \Gamma t (1 + [\psi_{h_3}] C_{h_3})}} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где Γ — среднее до ближайшего усиления железнодорожного пути (капитального или среднего ремонта) значение грузонапряженности, млн ткм на 1 км/год.

Как видно из (23), указанные допускаемые напряжения в несущих элементах железнодорожного пути зависят от их прочностных свойств, характеризующих коэффициентами α , b , d и n , от нормативных значений $[h]$, $[t]$ и $[\psi_h]$, от грузонапряженности Γ и от изменчивости h и σ , характеризующей коэффициентами C_h и C_σ .

Если в системе уравнений (1) заменить σ_k (кромочные изгибные напряжения в рельсах) на σ_p (контактные напряжения в головке рельса), использовать вместо допускаемых однозначных напряжений допускаемые напряжения, определяемые по (23), и наложить ограничения на $[\sigma]$, определяемые по (23), о непревышении $[\sigma]_0$ для разового нагружения (минимального значения предела текучести, минимального значения предела равновесия и т.п.), то получим условие прочности, которое объединяет условия (1) и (3). То есть получим одно условие прочности, которое будет необходимым и достаточным с точки зрения обеспечения как безопасности движения поездов, так и нормальных условий эксплуатации железных дорог:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p &\leq [\sigma_p], [\sigma_p] \leq [\sigma_p]_0; \\ \sigma_{ш} &\leq [\sigma_{ш}], [\sigma_{ш}] \leq [\sigma_{ш}]_0; \\ \sigma_6 &\leq [\sigma_6], [\sigma_6] \leq [\sigma_6]_0; \\ \sigma_3 &\leq [\sigma_3], [\sigma_3] \leq [\sigma_3]_0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Для подрельсовых элементов железнодорожного пути (шпал, балласта, земляного полотна) нормативы $[t]$ и $[\psi_h]$ могут быть константами, не зависящими от грузонапряженности. При этом графики функций (23) имеют вид, показанный на рис. 3.

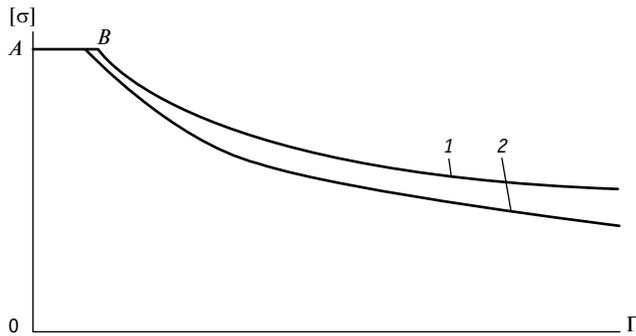


Рис. 3. Общий вид зависимости $[\sigma] = f(\Gamma)$ при $[t] = \text{const}$:
AB — значение $[\sigma]_0$ по прочности при разовом нагружении для локомотивов (1) и вагонов (2)

При малой грузонапряженности, когда получаемые по (23) $[\sigma] > [\sigma]_0$, принимается $[\sigma]_0$. Для рельсов же нормативы $[t]$ не может быть константой, так как неосуществимо требование уменьшения контактных напряжений с увеличением грузонапряженности, поскольку поезда вездеходны (и по грузонапряженным, и по малодейственным участкам) примерно с одинаковой допустимой скоростью и одинаковой максимально допустимой осевой нагрузкой. Поэтому для рельсов остается единственное требование, которое в принципе может быть осуществлено, — увеличение прочности рельсового металла с возрастанием грузонапряженности, т.е. на участках с более высокой грузонапряженностью должны укладываться более прочные рельсы, чем на малодейственных участках. При этом необходимая прочность рельсов должна определяться исходя из двух условий:

$$\begin{aligned} \sigma_k &\leq [\sigma_k]_0; \\ t &= n_1 \sqrt{\frac{[h_p]}{\alpha_1 \alpha_p \Gamma^{m_1} \gamma_p^{n_p} \sigma_{p,ср}^{n_p} (1 + [\psi_{h_p}] C_{h_p})}} \leq [t], \end{aligned} \quad (25)$$

где t — время между капитальными ремонтами железнодорожного пути, лет.

Здесь $[t]$ является функцией Γ и устанавливается на основе экономических расчетов и организационно-технических возможностей.

Необходимая распределяющая способность рельсов определяется из выполнения условий прочности (24) для шпал, балласта и земляного полотна.

Таким образом, с помощью системы уравнений (24) и (25) можно найти необходимую прочность железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования.

При обращении по участку нескольких существенно отличающихся по воздействию на путь групп подвижного состава, т.е. при воздействии нескольких совокупностей σ , существенно отличающихся значениями $\sigma_{ср}$ и C_σ общие накопленные повреждения h определяются следующим выражением:

$$h = \sum_{i=1}^{i=M} h_i m_i, \quad (26)$$

где M — количество совокупностей σ_i ;

m_i — доля i -й совокупности σ_i в формировании грузонапряженности,

$$m_i = \frac{\Gamma_i}{\Gamma}; \quad (27)$$

Γ_i — грузонапряженность, формируемая i -й группой подвижного состава, создающего совокупность σ_i .

При этом C_σ необходимо определять по формуле

$$C_\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=M} S_i^2 m_i}}{\sigma_{ср,ср}}, \quad (28)$$

где S_i — среднее квадратическое отклонение σ_i ;

$\sigma_{ср,ср}$ — среднее средних значений $\sigma_{ср,i}$

$$\sigma_{ср,ср} = \sum_{i=1}^{i=M} \sigma_{ср,i} m_i. \quad (29)$$

В таких случаях расчетные значения σ необходимо определять по формуле

$$\sigma = (1 + \psi_\sigma C_\sigma) \sum_{i=1}^{i=M} \sigma_{ср,i} m_i. \quad (30)$$

ВЫВОДЫ

Суть новизны метода расчета необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования состоит в следующем: детерминистическое условие прочности, которое является необходимым, но недостаточным для определения требуемой прочности пути, дополнено системой равенств, выражающих статистическую связь накопленных повреждений в несущих элементах пути с эквивалентными напряжениями и пропущенным тоннажем брутто.

Литература

1. Королев В. В. Предложение по применению криволинейных стрелочных переводов на Забайкальской железной дороге // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития. Задачи и пути их решения : сборник статей молодых ученых и аспирантов. Москва : Интекст, 2005. С. 32–36.
2. Королев В. В. Разработка нового контррельса, не связанного с ходовым рельсом // Безопасность движения поездов : сборник трудов 11-й научно-практической конференции. Москва : Изд-во МИИТ, 2010. С. 14–36.
3. Королев В. В. Технология санации для ремонта деревянных брусьев и шпал // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2011. Т. 4. № 4 (4). С. 67–68.
4. Титаренко М. И., Королев В. В. Анализ работы стрелочных башмаков, изготовленных по различным технологиям // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2012. Т. 5. № 5 (5). С. 109–110.
5. Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И., Королев В. В. Рельсовые элементы стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2013. № 11. С. 44–46. ISSN 0044–4448.
6. Королев В. В. Новые виды отказов подкладок с подушками и подкладок с упорами // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2014. Т. 7. № 7 (7). С. 51–63.
7. Королев В. В., Мальцев В. А. Организация работ по контролю рельсовых элементов стрелочных переводов на железных дорогах России // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2014. Т. 7. № 7 (7). С. 43–50.
8. Королев В. В. Новый контррельс для стрелочных переводов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2014. № 10. С. 46–48.
9. Королев В. В., Жукова А. А. Сравнительный анализ технологических процессов укладки стрелочных переводов различными машинными комплексами // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2015. Т. 8. № 8 (8). С. 161–165.
10. Применение методов анализа сочетаний размеров колесных пар и элементов стрелочных переводов для определения размеров желобов контррельсовых узлов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев, В. С. Кусков // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-3-9. ISSN 1815–9400.
11. Korolev V. Selecting a Turnout Curve Form in Railroad Switches for High Speeds of Movement // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 156–172. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_15. ISSN 2194–5357.
12. Korolev V. Change of Geometric Forms of Working Surfaces of Turnout Crosspieces in Wear Process // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 207–218. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_19. ISSN 2194–5357.
13. Korolev V. Guard Rail Operation of Lateral Path of Railroad Switch // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. Pp. 621–638. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_60. ISSN 2194–5357.
14. Korolev V. Switching shunters on a slab base // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 175–187. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_17. ISSN 2194–5357.
15. Korolev V. The study of rolling stock wheels impact on rail switch frogs // E3S Web of Conference. 2020. 164. 03033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403033>.

References

1. Korolev V. V. Proposal on application of double curve switches on the Zabaykai Railway [Predlozhenie po primeneniyu krivolinyeynykh strelochnykh perevodov na Zabaykal'skoy zheleznoy doroge] // Railway transport on modern stage of development. Tasks and ways of their solution : collection of papers of young scientists and post-graduates. Moscow : Intext, 2005. Pp. 32–36.
2. Korolev V. V. Development of a new check-rail not connected to a running rail [Razrabotka novogo kontrrel'sa, ne svyazannogo s khodovym rel'som] // Safety of railway operation : proceedings of the 11th research and practice conference. Moscow : Publishing House of MIIT, 2010. Pp. 14–36.
3. Korolev V. V. Technology of sanation for repair of wooden sleepers [Tekhnologiya sanatsii dlya remonta derevyannykh brus'ev i shpal] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2011. Vol. 4. No. 4 (4). Pp. 67–68.
4. Titarenko M. I., Korolev V. V. Analysis of operation of heel chairs made according to different technologies [Analiz raboty strelochnykh bashmakov, izgotovlennykh po razlichnym tekhnologiyam] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2012. Vol. 5. No. 5 (5). Pp. 109–110.
5. Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Korolev V. V. Rail elements of switches [Rel'sovye elementy strelochnykh perevodov] // Railway Transport. 2013. No. 11. Pp. 44–46. ISSN 0044–4448.
6. Korolev V. V. New types of failures of plates with pads and plates with stop blocks [Novye vidy otkazov podkladok s podushkami i podkladok s uporam] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2014. Vol. 7. No. 7 (7). Pp. 51–63.
7. Korolev V. V., Maltsev V. A. Organization of control of rail elements in switches on Russian railways [Organizatsiya rabot po kontrolyu rel'sovykh elementov strelochnykh perevodov na zheleznykh dorogakh Rossii] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2014. Vol. 7. No. 7 (7). Pp. 43–50.
8. Korolev V. V. New check rail for switches [Novyy kontrrel's dlya strelochnykh perevodov] // Modern problems of railway transport work improvement. 2014. No. 10. Pp. 46–48.
9. Korolev V. V., Zhukova A. A. Comparative analysis of technological processes of switch laying by various machine groups [Srvnitel'nyy analiz tekhnologicheskikh protsessov układki strelochnykh perevodov razlichnymi mashinnymi kompleksami] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2015. Vol. 8. No. 8 (8). Pp. 161–165.
10. Application of methods for analysing combinations of wheelset sizes and switch elements to determine the size of gutters of check-rail assemblies [Primenenie metodov analiza sochetaniy razmerov kolesnykh par i elementov strelochnykh perevodov dlya opredeleniya razmerov zhelobov kontrrel'sovykh uzlov] / B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, V. V. Korolev, V. S. Kuskov // Transport of the Urals. 2021. No. 2 (69). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-3-9. ISSN 1815–9400.
11. Korolev V. Selecting a Turnout Curve Form in Railroad Switches for High Speeds of Movement // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 156–172. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_15. ISSN 2194–5357.
12. Korolev V. Change of Geometric Forms of Working Surfaces of Turnout Crosspieces in Wear Process // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 207–218. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_19. ISSN 2194–5357.
13. Korolev V. Guard Rail Operation of Lateral Path of Railroad Switch // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. Pp. 621–638. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_60. ISSN 2194–5357.
14. Korolev V. Switching shunters on a slab base // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 175–187. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_17. ISSN 2194–5357.
15. Korolev V. The study of rolling stock wheels impact on rail switch frogs // E3S Web of Conference. 2020. 164. 03033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403033>.

Объем статьи 0,8 авторских листа

УДК 625.1

Борис Эйнихович Глюзберг, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс» АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,

Алексей Алексеевич Локтев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Вадим Вадимович Королев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Надежда Александровна Клековкина, магистрант Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Владислав Сергеевич Кусков, аспирант Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ИНТЕНСИВНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Boris Eynikhovich Glyuzberg, DSc in Engineering, Professor, Head of laboratory of Scientific Centre Track Infrastructure and Issues of Wheel-Rail Interaction, JSC VNIIZhT, Moscow, Russia,

Alexey Alexeevich Loktev, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vadim Vadimovich Korolev, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Nadezhda Alexandrovna Klekovkina, graduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vladislav Sergeevich Kuskov, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Principles of determination of required railway track strength with the consideration for intensity of its use

Аннотация

Нагрузка от воздействия подвижного состава, в отличие от веса верхнего строения железнодорожного пути (ВСП), является динамической и фактически передается на основную площадку через балластный слой. Поэтому величину напряжений и форму их эпюры на основной площадке, которые и принимаются в виде внешней нагрузки на земляное полотно, получить более сложно, чем от веса ВСП. В статье представлена методика расчета эквивалентной поездной нагрузки на железнодорожный путь. Для иллюстрации сущности понятия эквивалентных нагрузок рассмотрено два характерных примера, в которых проанализированы крайние случаи с различными нагрузками. Представлены результаты расчетов по формулам, изложенным в данной методике. Полученные решения уравнений позволяют определять значение эквивалентной нагрузки при любом поле охвата действующих нагрузок, в том числе и при асимметричных относительно пределов их ограничения. Сделан вывод о целесообразности расчета с помощью эквивалентных нагрузок. Выведена итоговая формула для определения эквивалентной поездной нагрузки на железнодорожный путь.

Ключевые слова: железнодорожный путь, эквивалентная нагрузка, методика расчета, решение уравнений, повреждение.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-53-61

Summary

Load from rolling stock in contrast with weight of a railway track is dynamic and actually is transmitted to the top of subgrade through a ballast bed. That is why it is more complicated to get a value of strain and a form of its diagram on the top of subgrade, which is considered as an external load on the subgrade, than just from the weight of a track. The paper presents a method of calculation of an equivalent train load on a railway track. For the presentation of intension of equivalent loads the authors have considered two typical examples where they have analysed extreme cases with various loads. The paper shows results of calculations by formulas described in the methodology. The equation solutions allow determining a value of the equivalent load of any field of coverage of acting loads including at asymmetric loads regarding to limits of their restrictions. The authors have made a conclusion on expediency of calculation with the use of equivalent loads. As a result, they have formulated a final formula for the calculation of an equivalent train load on a railway track.

Keywords: railway track, equivalent load, calculation method, solution of equations, damage.

Величина напряжений на основной площадке и их распределение по площади зависят от многих факторов: характеристик подвижного состава (в первую очередь от осевых нагрузок и расстояний между ними), скорости движения поезда, типа верхнего строения железнодорожного пути, характеристик самого земляного полотна, времени года и т.д. Поэтому определение параметров нагрузки от воздействия подвижного состава представляет собой сложную задачу, зависящую от того, в каких расчетах она будет использована. Рассмотрим методику расчета эквивалентной поездной нагрузки на железнодорожный путь [1–4].

Исходное условие методики — бесспорное положение о том, что накапливаемые за какой-либо период эксплуатации повреждения элементов железнодорожного пути зависят не только от величины действующих поездных нагрузок, но и от количества их воздействий в указанный период [5–8]. При этом в качестве меры повреждения могут выступать износ, усталостные трещины, остаточные деформации, выход из строя элементов железнодорожного пути и т.п. Для иллюстрации сущности понятия эквивалентных нагрузок рассмотрим два характерных примера.

Пример 1. Допустим, что на двух участках с одинаковой конструкцией железнодорожного пути и прочими равными условиями (такими как скорость движения, тип подвижного состава, план, профиль и прочность железнодорожного пути) средние значения нагрузок от оси на путь равны между собой ($P_{cp,1} = P_{cp,2}$), а их изменчивости, оцениваемые коэффициентом изменчивости C_p (отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению), существенно отличаются ($C_{p,1} \ll C_{p,2}$). Предположим, что $P_{max2} \gg P_{max1}$. Требуется выбрать такой параметр оценки силового воздействия на железнодорожный путь, с помощью которого можно однозначно сравнить последствия (накопленные за какой-либо заданный период эксплуатации повреждения элементов железнодорожного пути).

Так как средняя интенсивность накопления повреждения $h_{cp}^{(yд)}$ (средняя величина повреждения от одного воздействия нагрузки) зависит от величины нагрузки P (чем больше P , тем больше $h_{cp}^{(yд)}$) (рис. 1а), очевидно, что значение накопленных повреждений от воздействия нагрузок, соответствующих левой (заштрихованной на рис. 1б) половине площади дифференциальной функции распределения $p(P)$, не равно (меньше) значению накопленных повреждений от воздействия нагрузок, соответствующих правой (незаштрихованной на рис. 1б) половине.

Следовательно, средние значения нагрузок P_{cp} не могут быть таким параметром, поскольку $P_{cp,1} = P_{cp,2}$, а накапливаемые за какой-либо заданный период эксплуатации повреждения элементов железнодорожного пути на участке 2 больше, чем на участке 1. Это видно из рис. 1в, на котором показаны графики функции

$$h_{cp}(P) = h_{cp}^{(yд)}(P)p(P), \quad (1)$$

т. е. графики распределения накапливаемых за какой-либо заданный период эксплуатации повреждений элементов железнодорожного пути на участках 1 и 2 по величинам действу-

ющих на этих участках нагрузок. Если принять площадь, заключенную между графиком функции $h_{cp}(P)$ и осью абсцисс за единицу или за 100 % накапливаемых за заданный период повреждений, то заштрихованная площадь показывает долю повреждений, вызванных действием левой (заштрихованной) половины (см. рис. 1б) нагрузок [9–12].

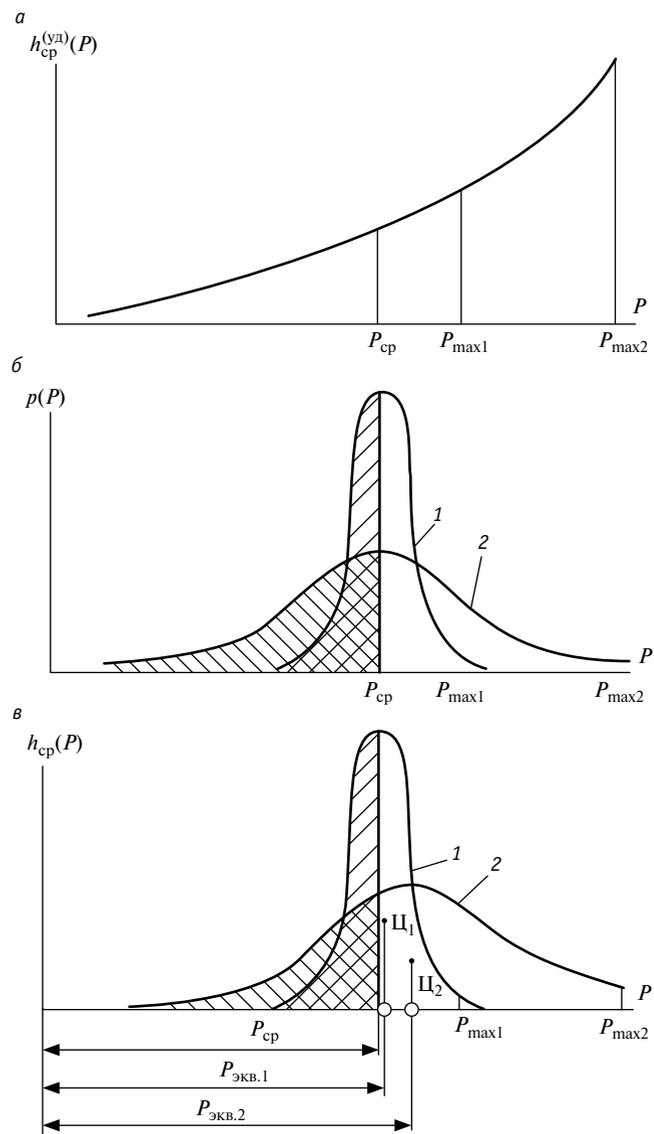


Рис. 1. Распределение интенсивности накопления повреждений по величине нагрузки:

1 — для участка 1; 2 — для участка 2;
 P_{cp} — средняя поездная нагрузка; $P_{экр}$ — эквивалентная поездная нагрузка; Ψ_1 и Ψ_2 — центры тяжести всей площади

Указанная доля на обоих участках меньше половины, но на участке 2 она меньше, чем на участке 1. Нагрузка, соответствующая центру тяжести всей площади, заключенной между графиком функции $h_{cp}(P)$ и осью абсцисс, является эквивалентной, так как ее действие N раз эквивалентно по величине накопленных повреждений N раз действию поездных нагрузок

с заданным на рис. 1б распределением вероятностей. Очевидно, что при одинаковых средних значениях нагрузок значения эквивалентных нагрузок могут существенно отличаться в зависимости от вида функций $p(P)$ и $h_{cp}^{(yд)}(P)$, а также от значений входящих в них параметров.

Пример 2. Допустим, что на двух участках с одинаковыми конструкцией, планом, профилем и прочностью железнодорожного пути максимальные (заданного уровня вероятности) нагрузки на путь одинаковы ($P_{max1} = P_{max2}$), а средние нагрузки на участках 1 и 2 существенно отличаются ($P_{cp.2} \gg P_{cp.1}$). Произведение функций $h_{cp}^{(yд)}(P)$ (рис. 2а), т.е. среднего значения повреждения от одного воздействия нагрузки, на дифференциальную функцию распределения вероятностей величин нагрузок $p(P)$ (рис. 2б) дает функцию распределения накапливаемых повреждений по величинам нагрузок, их вызвавших (рис. 2в). Из этого рисунка видно, что накапливаемые за какой-либо заданный период эксплуатации повреждения на участке 2 больше, чем на участке 1. Следовательно, максимальное значение нагрузки на железнодорожный путь тоже не является параметром, с помощью которого можно однозначно оценить силовое воздействие на железнодорожный путь по интенсивности накопления повреждений его элементов. Очевидно, что таким параметром будет эквивалентная нагрузка, численное значение которой равно абсциссе центра тяжести площади, ограниченной графиком функции $h_{cp}(P)$ и осью абсцисс (см. рис. 2в). Очевидно также, что эквивалентные нагрузки отличаются от средних тем больше, чем выше изменчивость нагрузок. Кроме того, из рис. 1 и 2 следует, что различие между эквивалентными нагрузками меньше:

различия между максимальными нагрузками при одинаковых средних

$$P_{экр.2} - P_{экр.1} < P_{max2} - P_{max1} (P_{cp} = const); \quad (2)$$

различия между средними нагрузками при одинаковых максимальных

$$P_{экр.2} - P_{экр.1} < P_{cp.2} - P_{cp.1} (P_{max} = const). \quad (3)$$

В рассмотренных примерах проанализированы крайние случаи с различными P_{max} но равными P_{cp} и с различными P_{cp} но равными P_{max} . На практике обычно бывают различия и P_{cp} и P_{max} поэтому однозначную и полную оценку силового воздействия на железнодорожный путь по накоплению повреждений его элементов можно производить с помощью эквивалентных нагрузок.

Если обозначить функцию средней интенсивности накопления повреждений (средней величины повреждения от одного воздействия нагрузки) от P через $h_{cp}^{(yд)}(P)$, а дифференциальную функцию распределения вероятностей значений нагрузок от P через $p(P)$, то функция эквивалентной нагрузки определяется как выражение абсциссы центра тяжести площади, заштрихованной между функцией $h_{cp}(P) = h_{cp}^{(yд)}(P)p(P)$, осью абсцисс (нагрузок P) и вертикалями, пересекающими ось абсцисс в сечениях P_1 и P_2 , соответствующих принятым ограничениям P_{min} и P_{max} по заданному уровню их вероятности (рис. 3).

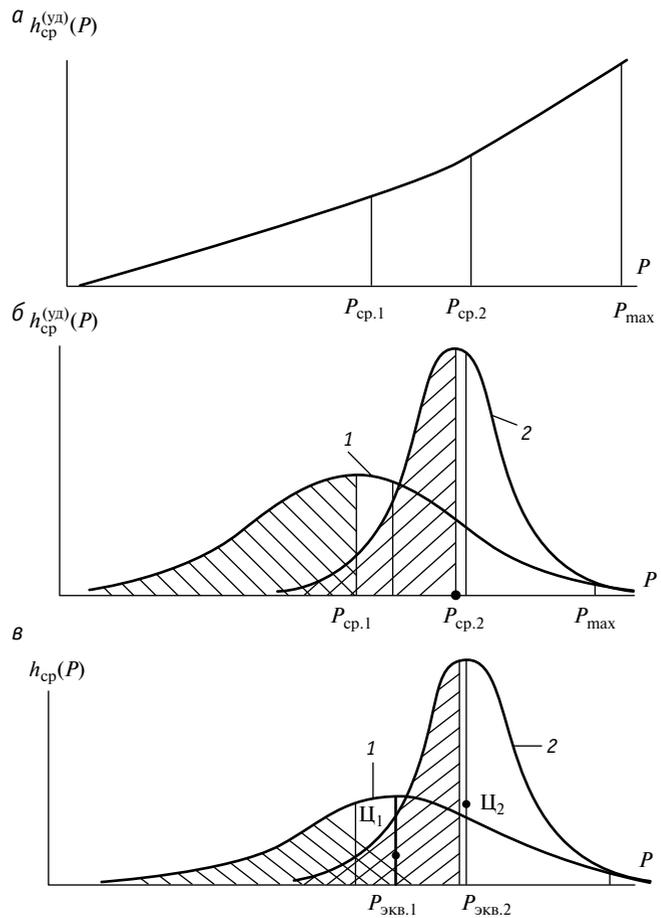


Рис. 2. Распределение плотностей вероятностей величин нагрузок: 1 — для участка 1; 2 — для участка 2

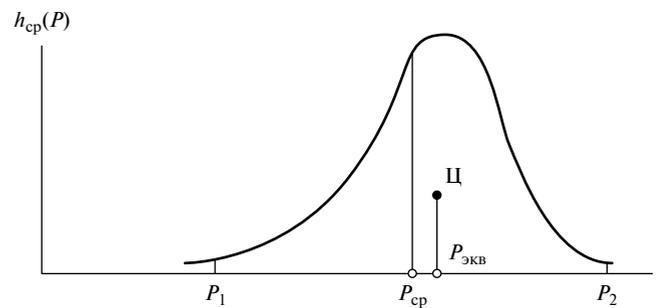


Рис. 3. Схема определения $P_{экр}$

При использовании в качестве меры повреждения усталостных дефектов (трещин) необходимо в качестве P_1 применять предел выносливости. В общем виде с учетом принятых обозначений аналитическое выражение эквивалентной нагрузки будет следующим:

$$P_{экр} = \frac{\int_{p_1}^{p_2} P h_{cp}^{(yд)}(P) p(P) dP}{\int_{p_1}^{p_2} h_{cp}^{(yд)}(P) p(P) dP}. \quad (4)$$

В принципе на основе уравнения (4) можно определять $P_{\text{экв}}$ при любых выражениях входящих в него функций $h_{\text{ср}}^{(yд)}(P)$ и $p(P)$. Однако практический смысл имеет приведение уравнения (4) к удобным для расчета формул с использованием наиболее простых, но подтвержденных практикой или экспериментом выражений функций $h_{\text{ср}}^{(yд)}(P)$ и $p(P)$. Опыт показывает, что в большинстве случаев с достаточной для практических целей точностью можно принять [13–15]:

$$h_{\text{ср}}^{(yд)}(P) = aP^n, \quad (n \geq 1); \quad (5)$$

$$p(P) = \frac{1}{C_p P_{\text{ср}} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(P - P_{\text{ср}})^2}{2C_p^2 P_{\text{ср}}^2}\right]. \quad (6)$$

При этом уравнение (4) будет иметь вид

$$P_{\text{экв}} = \frac{\int_{p_1}^{p_2} P^{n+1} \exp\left[-\frac{(P - P_{\text{ср}})^2}{2C_p^2 P_{\text{ср}}^2}\right] dP}{\int_{p_1}^{p_2} P^n \exp\left[-\frac{(P - P_{\text{ср}})^2}{2C_p^2 P_{\text{ср}}^2}\right] dP}. \quad (7)$$

После замены переменных:

$$\frac{P - P_{\text{ср}}}{C_p P_{\text{ср}}} = \psi_p, \quad (8)$$

где

$$P = P_{\text{ср}}(1 + C_p \psi_p) \text{ и } dP = P_{\text{ср}} C_p d\psi_p; \quad (9)$$

$$P_{\text{экв}} = \frac{P_{\text{ср}} \int_{p_1}^{p_2} (1 + C_p \psi_p)^{n+1} \exp[-0,5\psi_p^2] d\psi_p}{\int_{p_1}^{p_2} (1 + C_p \psi_p)^n \exp[-0,5\psi_p^2] d\psi_p}. \quad (10)$$

При этом пределы интегрирования:

$$P_1 = P_{\text{ср}}(1 + \psi_{p1} C_p) \text{ и } P_2 = P_{\text{ср}}(1 + \psi_{p2} C_p). \quad (11)$$

Уравнение (10) в общем виде в элементарных функциях не решается. Решим его для случаев $n = 1, n = 2, n = 3$ и $n = 4$. Анализ экспериментальных данных зависимости интенсивности накопления повреждений элементов железнодорожного пути от величины действующей на них поездной нагрузки [см. (5)] показывает, что указанные случаи ($n = 1 \div 4$) охватывают практически все поле экспериментальных значений n .

Общее решение уравнения (10) при $n = 1$:

$$P_{\text{экв}} = \frac{P_{\text{ср}} \int_{p_1}^{p_2} (1 + 2C_p \psi_p + C_p^2 \psi_p^2) \exp[-0,5\psi_p^2] d\psi_p}{\int_{p_1}^{p_2} (1 + C_p \psi_p) \exp[-0,5\psi_p^2] d\psi_p}. \quad (12)$$

Обозначим интеграл числителя через

$$A = A_1 + A_2 + A_3,$$

а интеграл знаменателя через

$$B = B_1 + B_2,$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \int_{p_1}^{p_2} \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p; \\ A_2 &= 2C_p \int_{p_1}^{p_2} \psi_p \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p; \\ A_3 &= C_p^2 \int_{p_1}^{p_2} \psi_p^2 \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p; \\ B_1 &= A_1 \text{ и } B_2 = 0,5A_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Преобразуя интеграл A_1 к табулированному интегралу Лапласа

$$\Phi^*(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^P \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p, \quad (14)$$

получим

$$A_1 = \sqrt{2\pi} [\Phi^*(P_2) - \Phi^*(P_1)]. \quad (15)$$

Интеграл A_2 приведем к табличному виду введением подынтегрального сомножителя ψ_p под знак дифференциала со знаком минус:

$$A_2 = -2C_p \int_{p_1}^{p_2} \exp(-0,5\psi_p^2) d(-0,5\psi_p^2).$$

В результате решения получим

$$A_2 = -2C_p [\exp(-0,5\psi_{p2}^2) - \exp(-0,5\psi_{p1}^2)]. \quad (16)$$

Выражение для A_3 проинтегрируем по частям:

$$A_3 = C_p^2 \int_{p_1}^{p_2} u dv = C_p^2 \left(uv \int_{p_1}^{p_2} - \int_{p_1}^{p_2} u du \right),$$

где $u = \psi_p$; $du = d\psi_p$; $dv = \psi_p \exp(0,5\psi_p^2)$; $v = -\exp(-0,5\psi_p^2)$.
 В результате решения имеем

$$A_3 = C_p^2 \left\{ \sqrt{2\pi} [\Phi^*(P_2) - \Phi^*(P_1)] - \psi_{p2} \exp(-0,5\psi_{p2}^2) + \psi_{p1} \exp(-0,5\psi_{p1}^2) \right\}. \quad (17)$$

Подставляя полученные выражения в формулу

$$P_{\text{экв}} = P_{\text{ср}} \frac{A_1 + A_2 + A_3}{A_1 + 0,5A_2}, \quad (18)$$

находим общее решение уравнения (10) при $n = 1$.

Общее решение уравнения (10) при $n = 2$:

$$P_{\text{экв}} = \frac{P_{\text{ср}} \int_{p_1}^{p_2} (1 + 3C_p \psi_p + 3C_p^2 \psi_p^2 + C_p^3 \psi_p^3) \times \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p}{\int_{p_1}^{p_2} (1 + 2C_p \psi_p + C_p^2 \psi_p^2) \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p}. \quad (19)$$



Обозначим интеграл числителя через

$$A' = A'_1 + A'_2 + A'_3 + A'_4,$$

а интеграл знаменателя через

$$B' = B'_1 + B'_2 + B'_3,$$

$$\left. \begin{aligned} A'_1 &= A_1; A'_2 = \frac{3}{2}A_2; A'_3 = 3A_3; \\ B'_1 &= A_1; B'_2 = A_2; B'_3 = A_3; \\ A'_4 &= C_p^3 \int_{p_1}^{p_2} \psi_p^3 \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

Проинтегрируем выражение для A'_4 по частям:

$$A'_4 = C_p^3 \int_{p_1}^{p_2} u dv = C_p^3 \left(uv \int_{p_1}^{p_2} - \int_{p_1}^{p_2} v du \right),$$

$$\text{где } u = \psi_p^2; du = 2\psi_p d\psi_p; dv = \psi_p \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p; \\ v = -\exp(0,5\psi_p^2).$$

В результате решения имеем

$$A'_4 = C_p^3 \left\{ \psi_{p1}^2 \exp(-0,5\psi_{p1}^2) - \psi_{p2}^2 \exp(-0,5\psi_{p2}^2) - \right. \\ \left. - 2 \left[\exp(-0,5\psi_{p2}^2) - \exp(-0,5\psi_{p1}^2) \right] \right\}. \quad (21)$$

Подставляя полученные выражения в формулу

$$P_{\text{экр}} = P_{\text{ср}} \frac{A'_1 + A'_2 + A'_3 + A'_4}{B'_1 + B'_2 + B'_3}, \quad (22)$$

находим общее решение уравнения (10) при $n = 2$.

Общее решение уравнения (10) при $n = 3$:

$$P_{\text{экр}} = \frac{P_{\text{ср}} \int_{p_1}^{p_2} (1 + 4C_p \psi_p + 6C_p^2 \psi_p^2 + 4C_p^3 \psi_p^3 + C_p^4 \psi_p^4) \times \\ \times \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p}{\int_{p_1}^{p_2} (1 + 3C_p \psi_p + 3C_p^2 \psi_p^2 + C_p^3 \psi_p^3) \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p}. \quad (23)$$

Обозначим интеграл числителя через

$$A'' = A''_1 + A''_2 + A''_3 + A''_4 + A''_5,$$

а интеграл знаменателя через

$$B'' = B''_1 + B''_2 + B''_3 + B''_4,$$

$$\left. \begin{aligned} A''_1 &= A_1; A''_2 = 2A_2; A''_3 = 6A_3; A''_4 = 4A_4; \\ B''_1 &= A_1; B''_2 = A_2; B''_3 = A_3; B''_4 = A_4; \\ A''_5 &= C_p^4 \int_{p_1}^{p_2} \psi_p^4 \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

Проинтегрируем выражение для A''_5 по частям:

$$A''_5 = C_p^4 \int_{p_1}^{p_2} u dv = C_p^4 \left(uv \int_{p_1}^{p_2} - \int_{p_1}^{p_2} v du \right),$$

$$\text{где } u = \psi_p^3; du = 3\psi_p^2 d\psi_p; dv = \psi_p \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p; \\ v = -\exp(-0,5\psi_p^2).$$

В результате решения имеем

$$A''_5 = C_p^4 \left\{ \psi_{p1}^3 \exp(-0,5\psi_{p1}^2) - \right. \\ \left. - \psi_{p2}^3 \exp(-0,5\psi_{p2}^2) + 3\sqrt{2\pi} \left[\Phi^*(P_2) - \Phi^*(P_1) \right] - \right. \\ \left. - 3\psi_{p2} \exp(-0,5\psi_{p2}^2) + 3\psi_{p1} \exp(-0,5\psi_{p1}^2) \right\}. \quad (25)$$

Подставляя полученные выражения в формулу

$$P_{\text{экр}} = P_{\text{ср}} \frac{A''_1 + A''_2 + A''_3 + A''_4 + A''_5}{B''_1 + B''_2 + B''_3 + B''_4}, \quad (26)$$

находим общее решение уравнения (10) при $n = 3$.

Общее решение уравнения (10) при $n = 4$:

$$P_{\text{экр}} = \frac{P_{\text{ср}} \int_{p_1}^{p_2} (1 + 5C_p \psi_p + 10C_p^2 \psi_p^2 + 10C_p^3 \psi_p^3 + \\ + 5C_p^4 \psi_p^4 + C_p^5 \psi_p^5) \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p}{\int_{p_1}^{p_2} (1 + 4C_p \psi_p + 6C_p^2 \psi_p^2 + 4C_p^3 \psi_p^3 + C_p^4 \psi_p^4) \times \\ \times \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p}. \quad (27)$$

Обозначим интеграл числителя через

$$A''' = A'''_1 + A'''_2 + A'''_3 + A'''_4 + A'''_5 + A'''_6,$$

а интеграл знаменателя через

$$B''' = B'''_1 + B'''_2 + B'''_3 + B'''_4 + B'''_5,$$

где

$$\left. \begin{aligned} A'''_1 &= A_1; A'''_2 = \frac{5}{2}A_2; A'''_3 = 10A_3; A'''_4 = 10A_4; A'''_5 = 10A_5; \\ B'''_1 &= A_1; B'''_2 = A_2; B'''_3 = A_3; B'''_4 = A_4; B'''_5 = A_5; \\ A'''_6 &= C_p^5 \int_{p_1}^{p_2} \psi_p^5 \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p \end{aligned} \right\}. \quad (28)$$

Проинтегрируем A'''_6 по частям:

$$A'''_6 = C_p^5 \int_{p_1}^{p_2} u dv = C_p^5 \left(uv \int_{p_1}^{p_2} - \int_{p_1}^{p_2} v du \right),$$

$$\text{где } u = \psi_p^4; du = 4\psi_p^3 d\psi_p; \\ dv = \psi_p \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p; \\ v = -\exp(-0,5\psi_p^2).$$

В результате имеем

$$A_6'' = C_p^5 \{ \psi_{p1}^4 \exp(-0,5\psi_{p1}^2) - \psi_{p2}^4 \exp(-0,5\psi_{p2}^2) + 4 [\psi_{p1} \exp(-0,5\psi_{p1}^2) - \psi_{p2} \exp(-0,5\psi_{p2}^2)] - 8 [\exp(-0,5\psi_{p2}^2) - \exp(-0,5\psi_{p1}^2)] \}. \quad (29)$$

Подставляя полученные выражения в формулу

$$P_{\text{ЭКВ}} = P_{\text{СР}} \frac{A_1'' + A_2'' + A_3'' + A_4'' + A_5'' + A_6''}{B_1'' + B_2'' + B_3'' + B_4'' + B_5''}, \quad (30)$$

находим общее решение уравнения (10) при $n = 4$.

Приведенные решения уравнения (10) позволяют определять значение $P_{\text{ЭКВ}}$ в зависимости от $P_{\text{СР}}$ и C_p (для различных n) при любом поле охвата действующих нагрузок, в том числе и при асимметричных относительно $P_{\text{СР}}$ в пределах их ограничения. Последнее необходимо при оценке прочности рельсов по усталостным повреждениям, поскольку нагрузки, значения которых меньше предела выносливости, не вызывают усталостных повреждений при любом количестве их воздействия. Поэтому при оценке прочности рельсов по усталостным повреждениям необходимо использовать в качестве нижнего предела интегрирования P_1 предел выносливости. Известно, что действующие на железнодорожный путь нагрузки изменяются не от $-\infty$ до $+\infty$, а в определенном ограниченном интервале от $P_{\text{мин}} = P_{\text{СР}}(1 + \psi_{p1}C_p)$ до $P_{\text{макс}} = P_{\text{СР}}(1 + \psi_{p2}C_p)$, где ψ_p — число ограниченной величины. При этом если в полученных выше решениях значения ψ_{p1} и ψ_{p2} принимаются соответствующими крайним значениям $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{макс}}$ усеченного нормального распределения вероятностей нагрузок, то выражения $\exp(-0,5\psi_{p1}^2)$ и $\exp(-0,5\psi_{p2}^2)$ в указанных решениях обращаются в ноль, так как вероятность нагрузок менее $P_{\text{мин}}$ и более $P_{\text{макс}}$ равна нулю. С учетом сказанного и вследствие равенства по абсолютным значениям величин $|\psi_{p1}| = |\psi_{p2}|$, при котором

$$\Phi^*(P_2) - \Phi^*(P_1) = 2\Phi(P_2), \quad (31)$$

где $\Phi(P_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{P_2} \exp(-0,5\psi_p^2) d\psi_p$ (табулированный интеграл), решения всех интегралов в уравнениях (18), (22), (26) и (30) значительно упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= A_1'' = A_1''' = A_1'''' = B_1 = B_1' = B_1'' = B_1''' = 2\sqrt{2\pi}\Phi(P_2); \\ A_2 &= A_2'' = A_2''' = A_2'''' = A_4 = A_4'' = A_4''' = A_4'''' = \\ &= B_2 = B_2' = B_2'' = B_2''' = B_4 = B_4'' = B_4''' = B_4'''' = 0; \\ A_3 &= 2\sqrt{2\pi}C_p^2\Phi(P_2); A_3' = B_3' = 3A_3; \\ A_3'' &= B_3'' = 6A_3; A_3''' = 10A_3; \\ A_5 &= B_5 = 6\sqrt{2\pi}C_p^4\Phi(P_2); A_5'' = 5A_5'''' \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

При этом итоговые формулы общего решения уравнения имеют следующий вид:

при $n = 1$ $P_{\text{ЭКВ}} = \gamma_1 P_{\text{СР}}$ (33)

где $\gamma_1 = 1 + C_p^2$, (34)

при $n = 2$ $P_{\text{ЭКВ}} = \gamma_2 P_{\text{СР}}$ (35)

где $\gamma_2 = \frac{1 + 3C_p^2}{1 + C_p^2}$; (36)

при $n = 3$ $P_{\text{ЭКВ}} = \gamma_3 P_{\text{СР}}$ (37)

где $\gamma_3 = \frac{1 + 6C_p^2 + 3C_p^4}{1 + 3C_p^2}$; (38)

при $n = 4$ $P_{\text{ЭКВ}} = \gamma_4 P_{\text{СР}}$ (39)

где $\gamma_4 = \frac{1 + 10C_p^2 + 15C_p^4}{1 + 6C_p^2 + 3C_p^4}$. (40)

Результаты расчетов по формулам (34), (36), (38) и (40) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов

n	Значение γ при C_p , равном				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
1	1,002	1,010	1,023	1,041	1,061
2	1,005	1,019	1,043	1,077	1,117
3	1,008	1,029	1,065	1,111	1,169
4	1,010	1,039	1,084	1,144	1,214

Графики функций (34), (36), (38) и (40) показаны на рис. 4, с их помощью можно без расчетов определять значения функции γ при известном значении C_p .

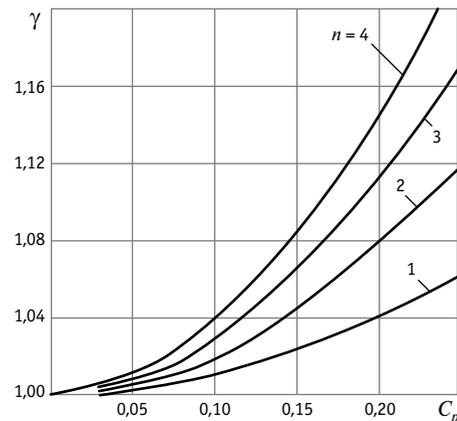


Рис. 4. Зависимость $\gamma = f(C_p)$

На рис. 5 представлены графики $\gamma = f(n)$, построенные по данным табл. 1 (штриховые линии) и показывающие, что эта зависимость близка к линейной ($\gamma = 1 + 0,94n$). При этом

погрешность от линеаризации тем меньше, чем меньше значение C_p . Сплошными линиями на рис. 5 обозначены графики аппроксимирующей линейной функции вида

$$\gamma = 1 + bn, \quad (41)$$

коэффициент аппроксимации которой b определен по методу наименьших квадратов исходя из условия

$$\sum_1^m [\gamma - (1 + bn)]^2 = \min.$$

Это условие соблюдается при

$$\frac{d}{db} \sum_1^m [\gamma - (1 + bn)]^2 = 0.$$

Отсюда

$$b = \frac{\sum_1^m (1 + \gamma)}{\sum_1^m n^2}.$$

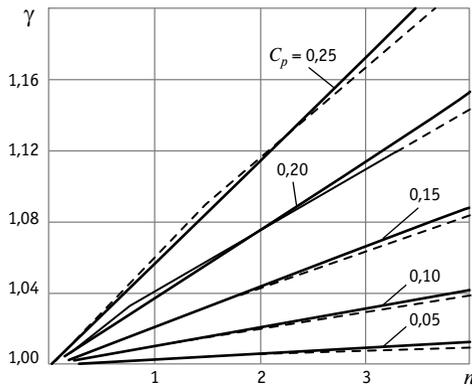


Рис. 5. Зависимость $\gamma = f(n)$

Рассчитанные таким образом значения коэффициента b приведены в табл. 2, где дана также оценка максимальной погрешности аппроксимации функции $\gamma = f(n)$ в пределах $0 \leq n \leq 4$ и $0 \leq C_p \leq 0,25$.

Таблица 2

Значения коэффициента b и максимальной погрешности

Показатель	Значение показателей при C_p , равном				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Коэффициент b	0,0025	0,0100	0,0217	0,0375	0,0567
Максимальная погрешность, %	0	0,1	0,3	0,5	1,1

Как следует из табл. 2, если заменить нелинейные функции $\gamma = f(n)$ линейными, то погрешность не превысит 1,1 %, что для практических расчетов приемлемо. Но при этом можно получить общее решение уравнения (10) в виде сложной трехпараметрической функции $P_{\text{ЭКВ}} = f(P_{\text{СР}}, C_p, n)$, т.е. функ-

ции трех переменных — $P_{\text{СР}}, C_p$ и n . Для этого сначала аппроксимируем полученные значения коэффициента b в зависимости от C_p . Такая аппроксимация после линеаризации функций $\gamma = f(n)$ правомерна, поскольку при этом b зависит только от C_p и во всех сечениях функции $\gamma = f(n)$ из условия подобия треугольников $b = f(C_p) = \text{const}$ (см. рис. 5).

На рис. 6 показан график функции $b = f(C_p)$, построенный по данным табл. 2 (штриховая линия), из которого видно, что полученная зависимость $b = f(C_p)$ наилучшим образом может быть аппроксимирована функцией вида $b = kC_p^N$. При этом полное совпадение зависимостей (фактической и аппроксимирующей) получается при $N = 1,85$. Для удобства использования округляем его до $N = 2$, а коэффициент k определяем по методу наименьших квадратов, исходя из условия, что $\sum_1^m [b - kC_p^2]^2 = \min$. Это условие соблюдается при

$$\frac{d}{dk} \sum_1^m [b - kC_p^2]^2 = 0.$$

Отсюда

$$k = \frac{\sum_1^m b C_p^2}{\sum_1^m C_p^4} = 0,922.$$

При этом

$$b = 0,94C_p^2 \quad (42)$$

и максимальная погрешность такой аппроксимации не превышает 3,5 %. График функции (42) показан на рис. 6 сплошной линией.

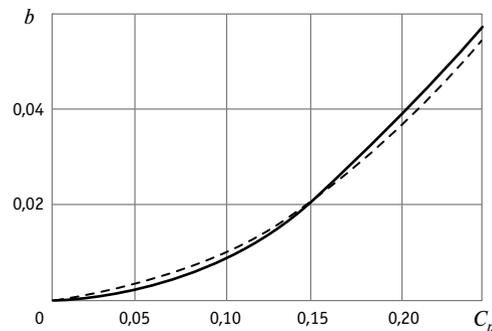


Рис. 6. Зависимость $b = f(C_p)$

Подставляя в (41) вместо b его выражение из (42), получим упрощенную итоговую формулу для определения γ в зависимости от n и C_p :

$$\gamma = 1 + 0,94nC_p^2. \quad (43)$$

При этом итоговая формула для расчета эквивалентной нагрузки будет иметь вид

$$P_{\text{ЭКВ}} = P_{\text{СР}}(1 + 0,94nC_p^2). \quad (44)$$

В табл. 3 представлены результаты расчетов γ по формуле (43).

Таблица 3

Результаты расчетов по формуле (43)

n	Значение γ при C_p равном				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
1	1,0024	0,0094	1,0212	1,0376	1,0587
2	1,0047	1,0188	1,0424	1,0752	1,1175
3	1,0071	1,0282	1,0634	1,1126	1,1760
4	1,0094	1,0376	1,0844	1,1503	1,2349

Сравнение данных табл. 1 и 3 показывает практическое совпадение результатов, что свидетельствует о возможности применения в расчетах упрощенных формул (43) и (44). Однако при $C_p > 0,25$ погрешность может быть существенной, поэтому в таких случаях необходимо пользоваться формулами (33)–(40).

Таким образом, параметром, однозначно оценивающим статистическую совокупность поездных нагрузок на железнодорожный путь по накапливаемым за какой-либо заданный период повреждениям его элементов, является эквивалентная нагрузка.

Литература

1. Глюзберг Б. Э., Калачев А. М., Королев В. В. Повышение эксплуатационных качеств крестовин стрелочных переводов за счет изменения их геометрии в контакте «колесо — рельс» // Наука и техника транспорта. 2004. № 1. С. 70–81. ISSN 2074–9325.
2. Шишкина И. В. Организация раздельного движения по стрелочным переводам // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 1. № 14. С. 26–30.
3. Глюзберг Б. Э., Королев В. В., Шишкина И. В. Анализ отказов основных элементов стрелочных переводов // Современные проблемы железнодорожного транспорта : сборник трудов по результатам международной интернет-конференции, Москва, 21–22 марта 2019 г. / Под общей редакцией К. А. Сергеева. Москва : РУТ (МИИТ), 2019. С. 591–597.
4. Шишкина И. В. Исследование сварных стыков стрелочного перевода // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 5. С. 32–35. ISSN 0033–4715.
5. Шишкина И. В. Цельнолитая подкладка с подушкой для стрелочных переводов нового поколения // Транспортное строительство : сборник статей всероссийской научно-технической конференции, Москва, 1–5 марта 2020 г. Москва : Перо, 2020. С. 51–73.
6. Характеристика лемехов импортного производства и приобретенные дефекты / И. В. Козарез, М. А. Михальченкова, А. А. Гущан [и др.] // Труды инженерно-технологического факультета Брянского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 70–84.
7. Требования к контрольному узлам стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, И. В. Шишкина, М. Е. Березовский // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 48–52. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-48-52. ISSN 1815–9400.
8. Шишкина И. В., Зверкова Н. В., Елесина Л. А. Роликовые устройства для улучшения работы переводных механизмов стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 12. С. 12–14. ISSN 0033–4715.
9. Королев В. В., Шишкина И. В. Моделирование и анализ элементов стрелочных переводов российских железных дорог с учетом использования инновационных технологий и материалов // Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии : материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А. А. Шестакова, Елец, 16–17 сентября 2020 г. Елец :

References

1. Glyuzberg B. E., Kalachev A. M., Korolev V. V. Increase of operational properties of switch crossings by the change of their geometry in «wheel — rail» contact [Povyshenie ekspluatatsionnykh kachestv krestovin strelochnykh perevodov za schet izmeneniya ikh geometrii v kontakte «koleso — rel's»] // Science and technology in transport. 2004. No. 1. Pp. 70–81. ISSN 2074–9325.
2. Shishkina I. V. Organization of separate passing of switches [Organizatsiya razdel'nogo dvizheniya po strelochnym perevodam] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2019. Vol. 1. No. 14. Pp. 26–30.
3. Glyuzberg B. E., Korolev V. V., Shishkina I. V. Analysis of failures of main elements of switches [Analiz otkazov osnovnykh elementov strelochnykh perevodov] // Modern problems of railway transport : proceedings of the International internet-conference, Moscow, March 21–22, 2019 / under the general editorship of K. A. Sergeev. Moscow : RUT (MIIT), 2019. Pp. 591–597.
4. Shishkina I. V. Study of welded joints of the switch [Issledovanie svarnykh stykov strelochnogo perevoda] // Railway Track and Facilities. 2020. No. 5. Pp. 32–35. ISSN 0033–4715.
5. Shishkina I. V. One-piece-cast plate with a pad for new generation switch [Tsel'nolitaya podkladka s podushkoy dlya strelochnykh perevodov novogo pokoleniya] // Transport construction : proceedings of the All-Russian scientific and technical conference, Moscow, March 1–5, 2020. Moscow : Stylus, 2020. Pp. 51–73.
6. Characteristics of imported shares and acquired defects [Kharakteristika lemekhov importnogo proizvodstva i priobretennye defekty] / I. V. Kozarez, M. A. Mikhalkhenkova, A. A. Gutsan [et al.] // Proceedings of the Engineering Department of Bryansk State Agrarian University. 2021. No. 1. Pp. 70–84.
7. Requirements for check-rail switch joints [Trebovaniya k kontrol'sovym uzlam strelochnykh perevodov] / B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, I. V. Shishkina, M. E. Berezovskiy // Transport of the Urals. 2021. No. 2 (69). Pp. 48–52. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-48-52. ISSN 1815–9400.
8. Shishkina I. V., Zverkova N. V., Elesina L. A. Roller devices for improvement of operation of switch reverse gears [Rolikovyye ustroystva dlya uluchsheniya raboty perevodnykh mekhanizmov strelochnykh perevodov] // Railway Track and Facilities. 2020. No. 12. Pp. 12–14. ISSN 0033–4715.
9. Korolev V. V., Shishkina I. V. Modeling and analysis of switch elements on Russian railways with the consideration for the use of innovation technologies and materials [Modelirovanie i analiz elementov strelochnykh perevodov rossiyskikh zheleznykh dorog s uchetom ispol'zovaniya innovatsionnykh tekhnologiy i materialov] // Control systems, complicated systems: modeling, sustainability, stabilization, intelligent technologies : proceedings of the 6th In-

Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2020. С. 436–453.

10. Мониторинг повреждаемости рельсов типа R65 при различных условиях эксплуатации на сети железных дорог России / М. Ю. Хвостик, Л. А. Джанполодова, И. В. Шишкина, Г. А. Берестень // Повышение эффективности устройства и содержания железнодорожного пути : сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ» / ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». Москва : ВМГ-Принт, 2014. С. 105–111.
11. Shishkina I. Hardening features for high manganese steel cores of crosspieces along the way // E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, November 20–22, 2019. Moscow : EDP Sciences, 2020. P. 14020. DOI: 10.1051/e3sconf/202016414020.
12. Shishkina I. Determination of Contact-Fatigue of the Crosspiece Metal // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. Pp. 834–844. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_82. ISSN 2194–5357.
13. Shishkina I. Wear Peculiarities of Point Frogs // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 197–206. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_18. ISSN 2194–5357.
14. Shishkina I. Change of Geometric and Dynamic-strength Characteristics of Crosspieces in the Operation // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 146–155. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_14. ISSN 2194–5357.
15. Shishkina I. Requirements to Check Rails of Railroad Switches // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 247. Pp. 179–187. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_18.

ternational research and practice conference dedicated to centenary since the birth of professor A. A. Shestakov, Elets, September 16–17, 2020. Elets : Elets State University named after I. A. Bunin, 2020. Pp. 436–453.

10. Monitoring of R65 rails fault probability at various operation conditions on Russian railways [Monitoring povrezhdaemosti rel'sov tipa R65 pri razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii na seti zheleznykh dorog Rossii] / M. Yu. Khvostik, L. A. Dzhanpoladova, I. V. Shishkina, G. A. Beresten' // Increase of efficiency of track laying and maintenance : collection of scientific papers of the JSC VNIIZhT scientist / JSC VNIIZhT. Moscow : VMG-Print, 2014. Pp. 105–111.
11. Shishkina I. Hardening features for high manganese steel cores of crosspieces along the way // E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, November 20–22, 2019. Moscow : EDP Sciences, 2020. P. 14020. DOI: 10.1051/e3sconf/202016414020.
12. Shishkina I. Determination of Contact-Fatigue of the Crosspiece Metal // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. Pp. 834–844. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_82. ISSN 2194–5357.
13. Shishkina I. Wear Peculiarities of Point Frogs // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 197–206. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_18. ISSN 2194–5357.
14. Shishkina I. Change of Geometric and Dynamic-strength Characteristics of Crosspieces in the Operation // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 146–155. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_14. ISSN 2194–5357.
15. Shishkina I. Requirements to Check Rails of Railroad Switches // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 247. Pp. 179–187. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_18.

Объем статьи 0,77 авторских листа

УДК 625.012

Андрей Владимирович Петряев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Владимир Николаевич Парамонов, доктор технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПОДШПАЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ ПРИ ЕГО СТАБИЛИЗАЦИИ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Andrey Vladimirovich Petryaev, PhD in Engineering, Senior Researcher, Road Construction of Transport Systems Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Vladimir Nikolaevich Paramonov, DSc in Engineering, Professor, Bases and Foundations Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Design analysis of sleeper bearing behaviour at stabilization by geosynthetic materials

Аннотация

Общая особенность реконструкции и строительства новых железных дорог заключается в необходимости качественного основания пути. При этом важную роль могут сыграть геосинтетические материалы, например, для улучшения несущей способности земляного полотна и увеличения срока службы путевой структуры в целом. Жесткость композитной системы «основание — георешетка» и изменение напряженно-деформированного состояния нестабилизированного подшпального основания по сравнению со стабилизированным оцениваются при помощи конечно-элементного моделирования. В статье по результатам проведенных лотковых испытаний дается сравнение осадки основания штампа на стабилизированном георешеткой и нестабилизированном щебеночном основании, а также с использованием численного моделирования оценивается эффективность усиления основания георешетками.

Ключевые слова: геосинтетический материал, балласт, стабилизация, штамповые испытания, георешетка.

Summary

Common feature of reconstruction and construction of new railways is in the need to have a high-quality track subgrade. Meanwhile, geosynthetic materials play an important role, for example, for improving bearing strength of the subgrade and for the increase of service life of track structure in whole. Hardness of the «subgrade — geogrid» composite system and the change of the stress-strain condition of unstabilized sleeper bearing in the comparison with the stabilized one are estimated with the use of the finite element modeling. According to results of culvert tests the paper presents comparison of plate settlement on the subgrade stabilized by the geogrid and unstabilized road-metal subgrade. Moreover, the authors assess the efficiency of subgrade strengthening by the geogrid with the use of numerical modeling.

Keywords: geosynthetic material, ballast, stabilization, plate loading tests, geogrid.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-62-67

ВВЕДЕНИЕ

В условиях увеличения грузонапряженности и интенсивности движения поездов решающее значение для обеспечения все возрастающего объема перевозок приобретают меры, направленные на усиление железнодорожного пути и на снижение расходов по его содержанию.

При внедрении малообслуживаемых конструкций пути укладка геосинтетических материалов становится одним из эффективных методов стабилизации подшпального основания, требующим минимальных затрат времени на все виды путевых работ [1–6]. Несмотря на это, в нормативных документах практически не содержится указаний и рекомендаций по расчетам таких конструкций.

Основная функция некоторых геосинтетических материалов, используемых в слоях несвязанного гранулированного материала на прочном основании, — стабилизация, причем механизмы, задействованные в ней, одинаковы для железной, автомобильной дороги или рабочей платформы. Ограничение горизонтальных деформаций приводит к образованию композитного слоя с повышенной жесткостью, а повышенная жесткость, в свою очередь, — к увеличению угла распределения нагрузки и уменьшению вертикальных деформаций.

Боковое удержание является основным механизмом стабилизации, который улучшает характеристики подшпального основания и, как следствие, увеличивает его несущую способность. Стабилизированный материал действует как некоторый композит. Эффективность стабилизации не является общей для всего семейства геосинтетических материалов и более всего проявляется для георешеток. Размещенные в зернистом слое подшпального основания, они предотвращают боковое перемещение несвязанных заполнителей, что создает вблизи георешетки упорочный слой. По мере удаления от георешетки зона влияния уменьшается [6–8].



Жесткость композитной системы «основание — георешетка», а также изменение напряженно-деформированного состояния нестабилизированного подшпального основания по сравнению со стабилизированным можно оценить при помощи конечно-элементного моделирования. В статье приводится сравнение работы основания штампа на стабилизированном георешеткой и нестабилизированном щебеночном основании по результатам лотковых испытаний. Кроме того, дана оценка эффективности усиления основания георешетками по результатам численного моделирования. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса FEM Models, разработанного сотрудниками кафедры «Основания и фундаменты» ПГУПС и группы компаний «Геореконструкция» [9, 10].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ КОМПОЗИТНОГО СЛОЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Известно, что грунт при нагружении работает как нелинейная среда. В нем практически отсутствуют обратимые деформации, все деформации — остаточные. В мировой геотехнической практике разработано достаточно большое количество математических моделей грунта. В частности, широкое распространение получила так называемая модель Hardening Soil Model (HSM), реализованная в программном комплексе PLAXIS [11]. Идеологически близка к ней упруго-вязко-пластическая модель, созданная российскими учеными А. Г. Шашкиным и К. Г. Шашкиным [9, 10], которая и применяется в настоящих расчетах.

При описании модели используется терминология, общепринятая в теории сплошных сред, применяется математический аппарат тензорного анализа.

Рассмотрим основные параметры упругопластической модели с независимым деформационным упрочнением при уплотнении и формоизменении.

Упругое поведение грунта и геосинтетического материала описывается с помощью таких параметров, как модуль упругости E_y и коэффициент Пуассона μ .

В практических расчетах статических задач упругие деформации грунта, как правило, незначительны, поэтому точность определения упругих характеристик не играет существенной роли. Для решения статических задач в большинстве случаев достаточно задавать модуль упругости в 5–10 раз больше модуля деформации грунта.

Для аппроксимации кривой объемного сжатия грунта используется зависимость

$$\varepsilon_{vp}(p, q) = \varepsilon_{vp}(p) = \lambda \cdot \ln \left(\frac{p + p_0}{p_0} \right), \quad (1)$$

где q — девиаторное напряжение, кПа;

λ — коэффициент пропорциональности кривой компрессионного сжатия;

p_0 — параметр кривизны компрессионной кривой, кПа.

Параметры λ и p_0 могут быть получены из компрессионных испытаний грунтов. Объемное давление в одометрических условиях p рассчитывается по формуле

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z), \quad (2)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — напряжения, направления которых параллельны координатным осям, кПа.

В практических расчетах в качестве параметров модели удобно задавать вместо λ модуль деформации и интервал давлений, в котором он получен.

Аппроксимация зависимости поведения грунта при сдвиге осуществляется степенной функцией вида

$$\gamma_p(p, q) = Aq^n, \quad (3)$$

где A — параметр соотношения величин,

$$A = \frac{\gamma_c}{\tau};$$

γ_c — параметр, определяющий величину пластических деформаций сдвига при достижении предельного состояния,

$$\gamma_c = \frac{3}{2} \varepsilon_{\max};$$

ε_{\max} — относительная максимальная вертикальная деформация до достижения предельного состояния в испытаниях;

τ — напряжение сдвига, кПа,

$$\tau = c_u + Mp,$$

c_u — удельное сцепление, кПа;

$$M = \frac{3 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi},$$

φ — угол внутреннего трения, град;

n — степень, определяющая кривизну зависимости τ – q .

Эти параметры могут определяться из стандартных трехосных испытаний.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

В процессе экспериментов контролируемые параметры (перемещения, напряжения и т.п.) измеряются в локальных точках. Численное же моделирование при правильно подобранных параметрах модели позволяет проанализировать полную картину напряженно-деформированного состояния. Чтобы оценить возможности использования описанной модели грунта, результаты расчета сравнивают с экспериментальными данными в контрольных точках.

При выполнении лотковых экспериментов мы использовали штамп прямоугольной в плане формы размерами 0,7×1,2 м. Размеры лотка в плане 3×4 м. В качестве основания применяли щебеночный грунт мощностью 1,2 м.

Исследовали эффект укладки двух слоев георешетки Tensar SS 2 в грунт основания и сравнили как с нестабилизированным случаем при нагрузке штампом.

С учетом симметрии в двух направлениях расчетная схема, показанная на рис. 1, представляет в плане четверть лотка, заполненного грунтом. Через штамп передается вертикальная нагрузка. В основании уложены два слоя геосинтетического материала: первый — на глубине 30, второй — на глубине 50 см от подошвы штампа. Характеристики материалов приведены в табл. 1.

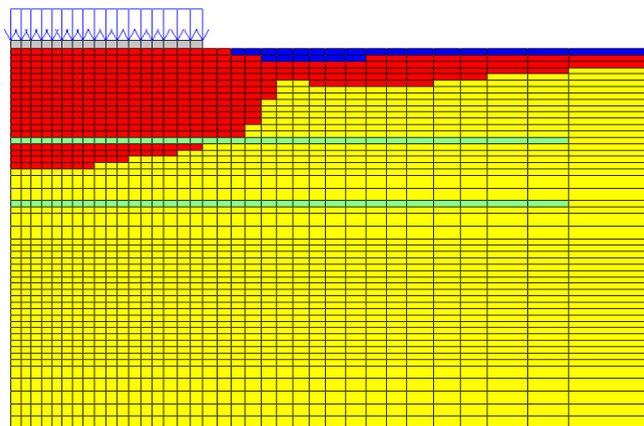


Рис. 1. Расчетная схема, области пластических деформаций (показаны красным цветом) на первом шаге решения и положение георешеток

Таблица 1

Характеристики материалов модели

Параметр	Слой	
	Щебень	Георешетка
Модуль деформации E , МПа	15	100
Коэффициент Пуассона ν	0,1	0,1
Объемный вес γ , кН/м ³	15,5	0,1
Удельное сцепление C , кПа	0	0
Угол внутреннего трения ϕ , град	60,5	60,5
Угол дилатансии ψ , град	7	0

Нагрузка на штамп прикладывалась ступенями. Зависимость между давлением на основание, стабилизированное двумя слоями георешетки, и осадкой штампа представлена на рис. 2.

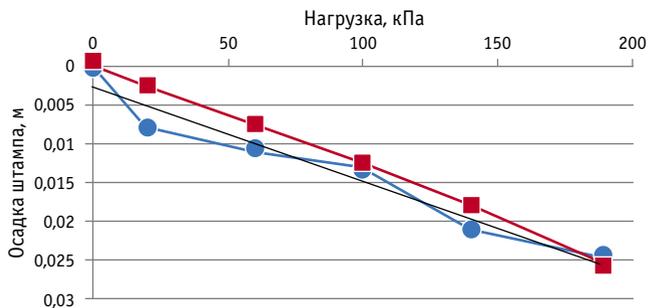


Рис. 2. Зависимость осадки штампа от нагрузки:
—●— эксперимент; —■— расчет

Как видно из рис. 2, результаты расчета деформаций, полученные с использованием разработанной численной модели, практически идентичны данным эксперимента: наклон экспериментальной кривой близок к расчетному.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ШТАМПОМ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛОМ

На рис. 3 показаны изолинии и эпюры вертикальных перемещений массива грунта при нагрузке 228 кПа. Как видно, вертикальные смещения грунта при укладке в основание геосинтетического материала меньше, чем без георешетки, что очевидно.

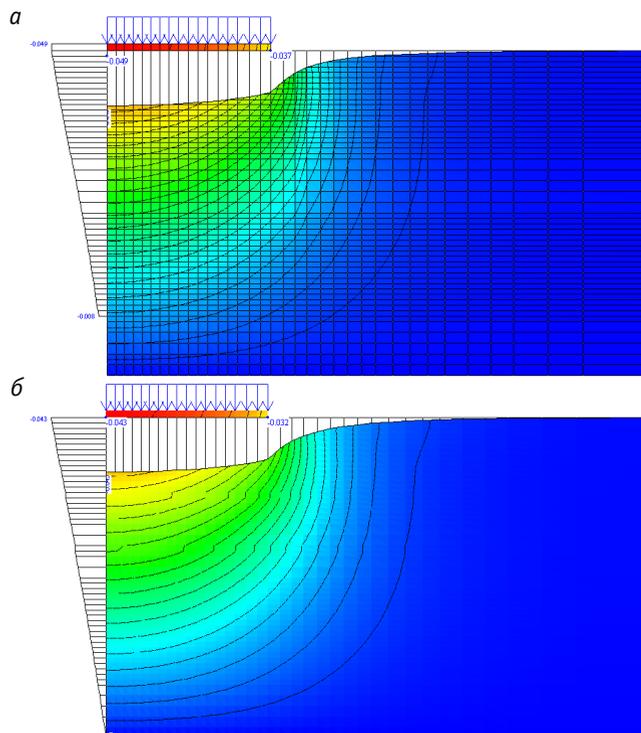


Рис. 3. Изолинии и эпюры вертикальных перемещений грунта (м) при нагрузке на штамп 228 кПа:

а — без усиления георешеткой; б — при усилении георешеткой

Кроме того, из-за частичной передачи усилий от грунта к геосинтетическому материалу приложенные нагрузки перераспределяются, и, следовательно, значения максимальных деформаций ниже уровня укладки георешеток уменьшаются, что иллюстрируется на рис. 4 почти горизонтальным характером распределения изолиний горизонтальных перемещений в зоне укладки геосинтетического материала.

При сравнении рис. 3 и 4 можно отметить, что укладка георешеток в большей степени изменяет качественный характер распределения горизонтальных перемещений, чем вертикальных. Таким образом, при укладке георешеток больший эффект проявляется в снижении горизонтальных смещений грунта. В частности, в рассматриваемом нами случае (см. рис. 4) горизонтальные смещения частицы грунта у края подошвы штампа снизились в 3 раза.

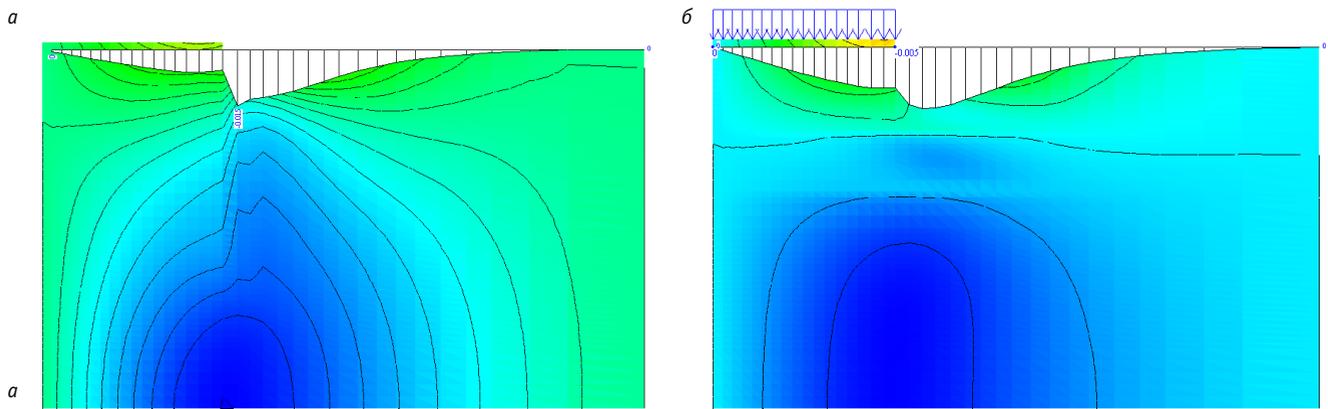


Рис. 4. Изолинии и эпюры горизонтальных перемещений грунта (м) при нагрузке на штамп 228 кПа: а — без усиления георешеткой; б — при усилении георешеткой

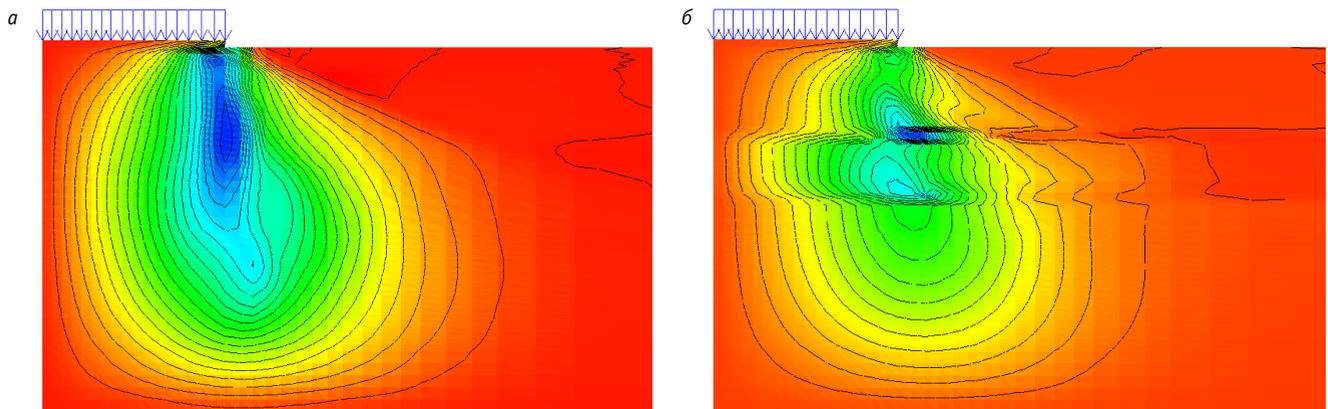


Рис. 5. Изолинии касательных напряжений без усиления (а) и при усилении (б) георешеткой

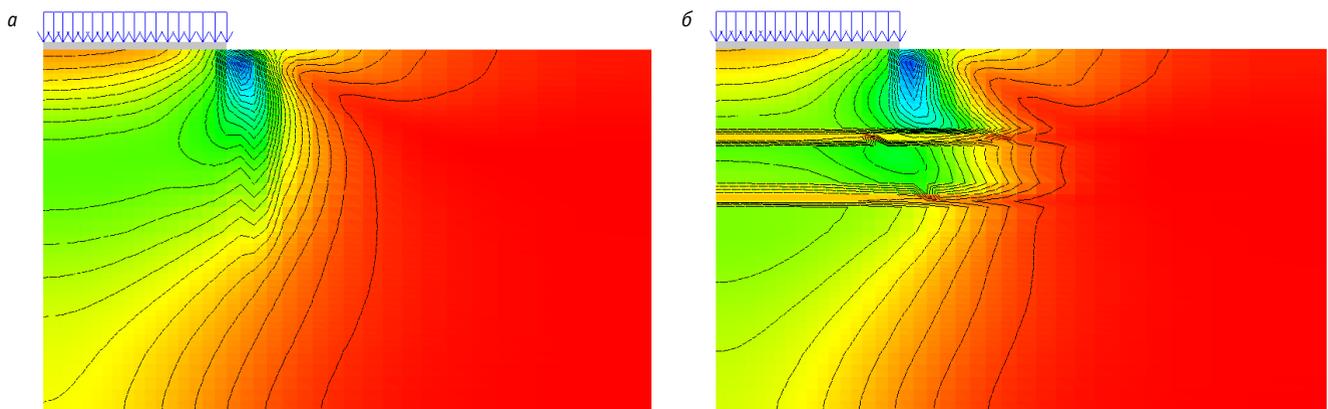


Рис. 6. Характер развития деформации сдвига в грунте без усиления (а) и при усилении (б) георешеткой

Существенно изменяется также характер распределения касательных напряжений. Такое распределение в грунте с георешеткой и без нее при давлении на основание 228 кПа показано на рис. 5. Значения изолиний не подписаны, поскольку в данном случае они не играют принципиальной роли. Из рис. 5 видно, что касательные напряжения в грунте концентрируются под краями штампа, формируя область разрушения грунта, которая распространяется в глубину. При укладке же двух

слоев геосинтетического материала из-за боковых ограничительных механизмов смещения частиц грунта происходит концентрация касательных напряжений вдоль геосинтетического материала, и тем самым глубина распространения процесса разрушения грунта ограничивается.

Различия в механизме развития деформаций сдвига в основании под штампом при стабилизации грунта двумя слоями геосинтетического материала отражает рис. 6.

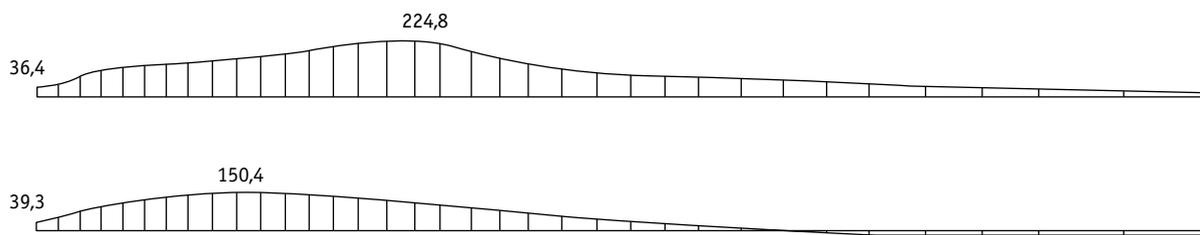


Рис. 7. Эпюры горизонтальных усилий (кН/пог. м) в верхнем и нижнем слоях геосинтетического материала при давлении под штампом 228 кПа

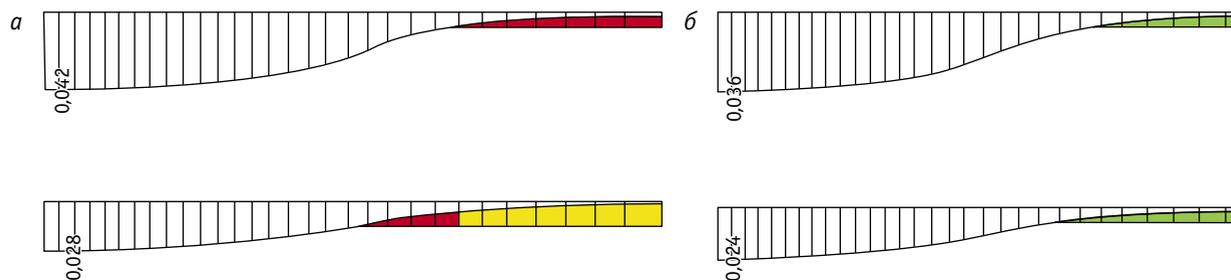


Рис. 8. Эпюры вертикальных перемещений в уровнях укладки в нестабилизированном (а) и стабилизированном (б) массиве, м

Как и для касательных напряжений, при отсутствии геосинтетического материала в основании имеет место развитие локальных зон сдвига у края штампа вниз. Чем больше развитие зоны сдвига, тем выше интенсивность приращения осадки штампа. Укладка геосинтетического материала под подошвой штампа прерывает развитие зон сдвига в глубь основания. В зоне укладки геосинтетического материала наблюдается снижение деформаций сдвига и смещение их концентрации вдоль верхнего слоя геосинтетического материала в сторону от штампа. При этом характер деформаций грунта, расположенного между слоями геосинтетического материала, представляет собой выдавливание в сторону от штампа.

В дополнение к качественной оценке распределения напряжений и деформаций в массиве грунта при его стабилизации геосинтетическим материалом получено также количественное распределение растягивающих усилий в георешетках (рис. 7). Для каждого слоя георешетки максимальное растягивающее усилие приурочено к зоне наибольших касательных напряжений. При этом максимальное растягивающее усилие в верхнем слое георешетки больше, чем в нижнем.

Для сравнения на рис. 8 представлены вертикальные перемещения грунта в уровнях укладки геосинтетического материала при давлении по подошве штампа 228 кПа.

Максимальные перемещения (см. рис. 8) предсказуемо наблюдаются под штампом, снижаясь в сторону от него, при этом

абсолютные значения вертикальных перемещений при укладке геосинтетического материала в рассматриваемом случае снижаются на 15 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведенные примеры, а также сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными свидетельствуют о том, что предложенный подход к моделированию геосинтетического материала в ограниченных грунтовыми условиями приемлем для прогнозирования поведения механически стабилизированного подшпального основания. Используемая в расчетах модель грунта успешно описывает механизмы передачи нагрузки, взаимодействие геоматериала и грунта на микроуровне, а реакция модели соответствует опубликованным результатам измерений.

2. В процессе численного моделирования получены эффекты, которые проблематично выявить экспериментами. Например, показано, что при укладке георешеток больший эффект проявляется в снижении горизонтальных смещений грунта, чем в снижении вертикальных смещений.

3. При укладке в основание штампа двух слоев геосинтетического материала касательные напряжения и деформации сдвига концентрируются вдоль георешетки, тем самым глубина распространения процесса разрушения грунта ограничивается.

Литература

1. Ашпиз Е. С. Усиление основной площадки земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. 2004. № 4. С. 29–33. ISSN 0033–4715.
2. Дыдышко П. И., Кривоногов В. Г., Макаров В. В. Моделирование усиления подшпального основания // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 14. С. 37–39. ISSN 0033–4715.
3. Вальцева Т. Ю. Деформируемость железнодорожных насыпей на слабых основаниях, усиленных геосинтетическим материалом : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Хабаровск, 2011. 149 с.
4. Абдурашитов А. Ю., Дыдышко П. И., Мелиоранский А. В. Укладка объемной георешетки в защитном подбалластном слое // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 3. С. 29–32. ISSN 0033–4715.
5. Певзнер В. О., Белоцветова О. Ю., Третьяков И. В. Эффективность георешетки // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 8. С. 22–23. ISSN 0033–4715.
6. Petriaev A. Modeling of a Railway Roadbed Reinforcement // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. 2020. Vol. 2. Pp. 27–35. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_4.
7. Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behavior during deformation / Alagiyawanna A. M. N., Sugimoto M., Sato S., Toyota H. // Geotextiles and Geomembranes. 2001. Vol. 19. No. 8. Pp. 483–507. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00020-6.
8. Hossain B., Hossain Z., Saka T. Interaction Properties of Geosynthetic with Different Backfill Soils // International Journal of Geosciences. 2012. 3. Pp. 1033–1039. DOI: 10.4236/ijg.2012.35104.
9. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Упруго-вязко-пластическая модель структурно-неустойчивого глинистого грунта // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2005. № 9. С. 221–228.
10. Шашкин А. Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 13. С. 173–205.
11. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: Formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema, Rotterdam, 1999. Pp. 281–296. DOI: 10.1201/9781315138206-27.

References

1. Ashpiz E. S. Strengthening of subgrade top [Usilenie osnovnoy ploshhadki zemlyanogo polotna] // Railway Track and Facilities. 2004. No. 4. Pp. 29–33. ISSN 0033–4715.
2. Dydyshko P. I., Krivonogov V. G., Makarov V. V. Modeling of strengthening of sleeper bearing [Modelirovanie usileniya podshpal'nogo osnovaniya] // Railway Track and Facilities. 2008. No. 14. Pp. 37–39. ISSN 0033–4715.
3. Valtseva T. Yu. Deformability of railway embankments on weak subgrades reinforced with geosynthetic materials [Deformiruemosť zheleznodorozhnykh nasypov na slabyykh osnovaniyakh, usilennykh geosinteticheskim materialom] : PhD in Engineering Thesis. Khabarovsk, 2011. 149 p.
4. Abdurashitov A. Yu., Dydyshko P. I., Melioranskiy A. V. Laying of volume geogrid in protective base layer [Ukladka ob'emnoy georeshetki v zashhitnom podballastnom sloe] // Railway Track and Facilities. 2011. No. 3. Pp. 29–32. ISSN 0033–4715.
5. Pevzner V. O., Belotsvetova O. Yu., Tretyakov I. V. Geogrid efficiency [Effektivnost' georeshetki] // Railway Track and Facilities. 2010. No. 8. Pp. 22–23. ISSN 0033–4715.
6. Petriaev A. Modeling of a Railway Roadbed Reinforcement // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. 2020. Vol. 2. Pp. 27–35. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_4.
7. Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behavior during deformation / Alagiyawanna A. M. N., Sugimoto M., Sato S., Toyota H. // Geotextiles and Geomembranes. 2001. Vol. 19. No. 8. Pp. 483–507. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00020-6.
8. Hossain B., Hossain Z., Saka T. Interaction Properties of Geosynthetic with Different Backfill Soils // International Journal of Geosciences. 2012. 3. Pp. 1033–1039. DOI: 10.4236/ijg.2012.35104.
9. Shashkin A. G., Shashkin K. G. Elastic viscous-plastic model of structurally unstable clay ground [Uprugo-vyazko-plasticheskaya model' strukturno-neustoychivogo glinistogo grunta] // Reconstruction of cities and geotechnical construction. 2005. No. 9. Pp. 221–228.
10. Shashkin A. G. Elastic viscous-plastic model of clay ground behaviour [Vyazko-uprugoplasticheskaya model' povedeniya glinistogo grunta] // Development of cities and geotechnical construction. 2011. No. 13. Pp. 173–205.
11. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: Formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema, Rotterdam, 1999. Pp. 281–296. DOI: 10.1201/9781315138206-27.

Объем статьи 0,68 авторских листа

УДК 625.012

Андрей Владимирович Петряев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Евгений Владимирович Федоренко, кандидат геолого-минералогических наук, научный консультант «НИП-Информатика», Санкт-Петербург, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ГРУНТОМ ПОДШПАЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ

Andrey Vladimirovich Petryaev, PhD in Engineering, Senior Researcher, Road Construction of Transport Systems Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Evgeniy Vladimirovich Fedorenko, PhD in Geology and Mineralogy, Scientific Adviser, «NIP-Informatika», St. Petersburg, Russia

Numerical modeling of interaction of geosynthetic material with sleeper bearing ground

Аннотация

Укладка геосинтетических материалов относится к числу эффективных методов стабилизации подшпального основания железнодорожного пути. Основным механизмом стабилизации является боковое удержание, позволяющее улучшить характеристики подшпального основания и, как следствие, увеличить его несущую способность. В статье рассматривается подход к моделированию георешетки как в не ограниченных, так и в ограниченных грунтом условиях. Численная модель сначала проверяется результатами испытаний, а затем используется для исследования детального поведения георешетки в массиве грунта. Для моделирования поведения георешетки при растягивающей нагрузке выполняется нелинейный анализ методом конечных элементов. При растягивающем нагружении модель охватывает диапазоны упругих и пластических областей зависимости «напряжение — деформация». Геометрия георешетки моделируется с ее подробными характеристиками, включая толщину ребер.

Ключевые слова: геосинтетический материал, грунт, стабилизация, тест на выдергивание, георешетка.

Summary

Laying of geosynthetic materials is one of the efficient methods for stabilization of railway track sleeper bearing. Side keeping is the main mechanism of stabilization that allows improving characteristics of sleeper bearing and as a consequence allows increasing bearing strength. The paper considers an approach to modeling of geogrid both in unlimited and limited ground conditions. A numerical model is firstly checked by test results and then is used for studying behaviour of the geogrid in ground body. For the modeling of the geogrid behaviour at tensile loading the authors carry out a nonlinear analysis by the finite element method. At tensile loading the model covers bands of elastic and plastic areas of the «stress-strain» dependence. The geometry of the geogrid is modeled with its detailed characteristics including flange thickness.

Keywords: geosynthetic material, ground, stabilization, pull-out test, geogrid.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-68-73

ВВЕДЕНИЕ

Среди малообслуживаемых конструкций железнодорожного пути укладка геосинтетических материалов является одним из эффективных методов стабилизации подшпального основания. В частности, как показали исследования [1–6], геосинтетические материалы позволяют повысить несущую способность и снизить деформативность подшпального основания. Вместе с тем действующие СП 119.13330.2017 и СП 238.1326000.2015 практически не содержат указаний и рекомендаций по проведению расчетов указанных конструкций.

Подход к проектированию основания, усиленного геосинтетическими материалами, зависит от понимания функции и механизма стабилизации зернистых материалов. Характеристики геосинтетических материалов, такие как жесткость, размер и форма отверстий, форма ребер, целостность узлов и т.д., несомненно, имеют большое значение [7, 8]. Механизмы взаимодействия меняются в зависимости от свойств геосинтетического материала, а также от свойств стабилизируемого заполнителя, условий нагружения и т.д. [9–11].

Выполняемый расчет подшпального основания предполагает не точный прогноз поведения при проходе подвижного состава, а оценку его напряженно-деформированного состояния. Вероятностный характер оценки обусловлен разбросом прочностных и деформационных характеристик грунтов и различного рода допущениями, связанными с упрощением расчетных схем и невозможностью в ряде случаев получить решения в замкнутом виде. Усложнение математической модели ведет к необходимости получения дополнительных параметров грунтов в ходе инженерно-геологического обследования. Естественный разброс определяемых свойств грунтов, слагающих основание, приводит к снижению достоверности

поведения всей конструкции пути в натуральных условиях. Если новая модель поведения грунта описывает особенности его работы, которые существенно влияют на результаты расчета конструкции, то ее разработку можно считать оправданной.

Альтернативным способом изучения напряжений и деформаций в конструкциях подшпального основания, стабилизированного геосинтетическими материалами, является численный анализ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель данного исследования состоит в том, чтобы предложить подход к моделированию георешетки как в неограниченных, так и в ограниченных грунтом условиях. Это достигается в два этапа: сначала численная модель проверяется результатами испытаний, а затем используется для исследования детального поведения георешетки в массиве грунта.

Для моделирования поведения георешетки при растягивающей нагрузке выполнен нелинейный анализ МКЭ. Определяющая модель, используемая в анализе МКЭ, способна охватывать диапазоны упругих и пластических областей зависимости «напряжение — деформация» при растягивающем нагружении. Геометрия георешетки моделируется с ее подробными характеристиками, включая толщину ребер.

Модели, представленные в данном исследовании, выполнены с использованием программного обеспечения конечных элементов PLAXIS.

Экспериментальные результаты показывают, что образец георешетки ведет себя как нелинейный упругопластический материал. Поэтому упрощение модели с использованием линейной эластичности может привести к неправильному результату. Необходима практическая конститутивная модель, способная описывать как нелинейность, так и пластичность материала.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Для создания модели георешетки необходимы три основных компонента: определяющее поведение, геометрия и граничные условия.

Двухосная георешетка, используемая в данном исследовании, состоит из двух основных элементов — полотна и поперечных стержней. Эти элементы объединяются вместе, образуя структуру георешетки.

Геосинтетический материал моделируется специальным элементом geogrid, который может быть задан такими параметрами, как:

- анизотропное-изотропное поведение;
- осевая жесткость, в том числе нелинейная зависимость между усилием и деформацией;
- предельное значение усилия;
- поведение во времени (реологические свойства).

Элемент не имеет жесткости при изгибе и воспринимает только растягивающие усилия. После создания сетки конечных элементов geogrid представлен шестиузловыми треугольными элементами, имеющими по три степени свободы в узле. Матрицы жесткости элементов основаны на их свойствах, определяемых наборами данных по материалам, и по-

лучены путем численного интегрирования по формуле Гаусса. Под действием растягивающего усилия элемент может изменять свою длину. Если элемент geogrid соединен с другим конструктивным элементом, они имеют общие степени свободы в узле (узлах) соединения.

Для моделирования испытания на одноосное растяжение в продольном направлении георешетка удерживается вдоль правой стороны, а нагрузка прикладывается с противоположной стороны. Контактное взаимодействие элемента с кластерами отсутствует.

Нами проведена серия испытаний, включающих одноосное растягивающее нагружение для измерения деформации образцов георешетки.

Расчетная схема представлена на рис. 1, элемент жестко закреплен с одной стороны, а с другой прикладывается растягивающее усилие. Ширина тестового образца 1 м, длина 1 м. К образцу через нерастяжимую пластину прикладывается усилие с помощью преднатяжения анкера. Конец материала жестко закреплен при помощи элементов заданного перемещения с фиксацией по всем трем осям.

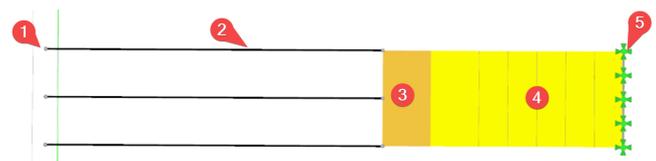


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема испытания на растяжение армирующего элемента:

- 1, 5 — закрепление узлов элементов; 2 — анкера с преднатяжением;
- 3 — жесткая пластина; 4 — полотно геосинтетического материала

Калибровка выполнена для переменной жесткости геосинтетического материала (см. рис. 1) по результатам испытаний на растяжение.

При верификации модели к образцу прикладывалось усилие 40 кН, обеспечивающее выход за пределы линейной зависимости графика «усилие — деформация». Сопоставление результатов лабораторных испытаний и моделирования представлено на рис. 2.

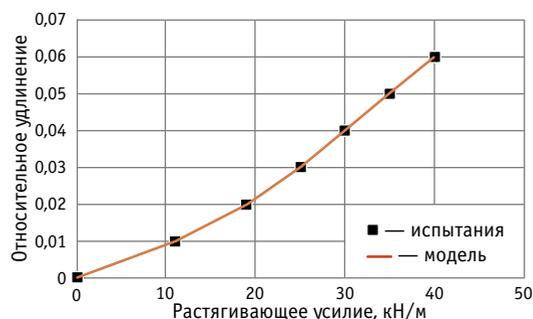


Рис. 2. Результаты испытаний геосинтетического материала

Как видно из рис. 2, зависимость деформации от нагрузки георешетки в основном нелинейна, при этом по мере приближения к разрушению развиваются значительные пластические

деформации. Следует отметить, что, хотя приведенная зависимость представляет конкретную двухосную георешетку, используемую в данном исследовании, аналогичный подход может применяться и для других типов георешеток.

Распределение напряжений внутри геоматериала показано на рис. 3.

Как видно из рис. 3, изополя осевого усилия в полотне имеют небольшой разброс (градиация цвета), что связано с неравномерностью распределения усилия при растяжении за счет сужения материала в поперечном направлении.

Исследования показали, что разработанная модель адекватно отражает поведение георешетки под нагрузкой и может применяться для моделирования грунта, стабилизированного геосинтетическим материалом.

С использованием модели, разработанной на первом этапе, далее выполнен анализ поведения георешетки, ограниченной грунтом, для валидации модели.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУНТА И ГЕОСИНТЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВЫДЕРГИВАНИИ

Расчетная схема представлена в виде ящика, внутри которого грунт, а сверху приложена сжимающая нагрузка (рис. 4).

Для реализации процесса выдергивания в этом варианте рассмотрен способ крепления элемента geogrid со стенкой ящика, которая в PLAXIS является граничным условием с запретом перемещения точек по горизонтали (только вертикальные перемещения), при помощи элемента node-to-node anchor (анкер). Анкер как элемент имеет лишь две точки контакта с сеткой конечных элементов, поэтому изменение его длины при условии фиксированной точки на стенке (граничное условие схемы) окажет влияние только в точке на другом конце, т.е. в месте контакта с геосинтетическим материалом. Изменение длины анкера (сжатие) задано с помощью функции преднатяжения. Для удобства преднатяжение задается равным 1000 кН.

Полотно геосинтетического материала (geogrid) присоединено к нерастяжимой пластине (элемент plate с высокой жесткостью и малой толщиной), которую могут тянуть один или несколько

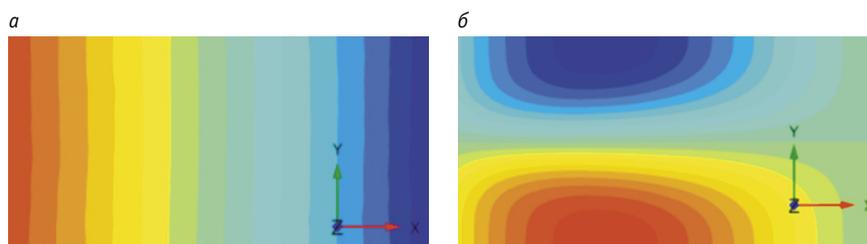


Рис. 3. Изолинии перемещений (а) и усилий (б) в материале при продольном растяжении

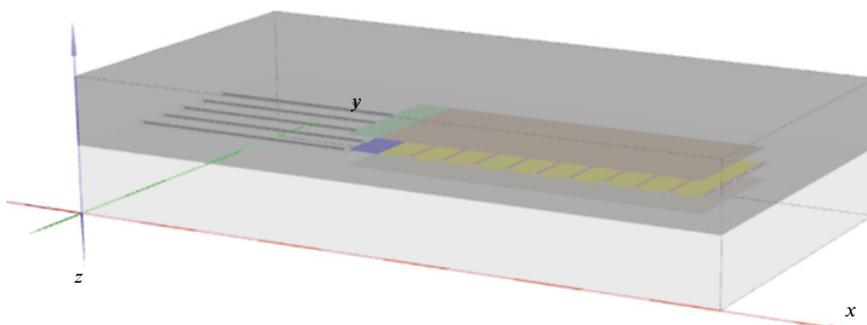


Рис. 4. Расчетная схема исследования взаимодействия геосинтетического материала и грунта при выдергивании

стержневых элементов (элемент node-to-node) за счет заданного им преднатяжения. Элемент plate позволяет передавать равномерное усилие от стержней к полотну геосинтетического материала. Сверху и снизу полотна располагается грунт, а контактное взаимодействие осуществляется за счет элемента interface, для которого над пластиной задано нулевое трение. При моделировании вытягивания такая система позволяет обойти проблему выхода геоматериала за граничные условия.

Дополнительно на полотне геосинтетического материала заданы поперечные ребра из элементов plate с высотой 5 см и шагом 10 см. Таким образом, рассматриваемая далее конструкция, во-первых, позволит оценить достоверность подобного упрощения по отношению к реальным испытаниям; во-вторых, обеспечит получение информации об усилиях и перемещении в полотне элемента geogrid, параметры которого заданы традиционным для этих материалов способом и с учетом специфических особенностей; в-третьих, она более реализуема на практике по сравнению со способом моделирования георешетки стержневыми элементами по сетке.

Для моделирования грунта использована упругопластическая модель с упрочнением Hardening Soil Small (HSS), поверхность текучести которой не зафиксирована в пространстве главных напряжений и может расширяться благодаря пластическому деформированию [12, 13]. Модель проявляет два типа упрочнения — при сдвиге и при сжатии.

Упрочнение при сдвиге применяется для моделирования необратимых деформаций, возникающих в результате первичного девиаторного нагружения. Функция текучести для девиаторного нагружения f_s задается уравнением

$$f_s = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{2q}{E_{ur}} - \gamma_p, \quad (1)$$

где E_{50} — секущий модуль деформации при 50 % значений девиатора, кПа;
 q — девиаторное напряжение, кПа;
 q_a — асимптотическое девиаторное напряжение, кПа;
 E_{ur} — модуль упругости при разгрузке — повторном нагружении, кПа;
 γ_p — параметр упрочнения.
 Упрочнение при сжатии используется для моделирования необратимых пласти-

ческих деформаций, обусловленных первичным уплотнением при одометрическом и изотропном нагружении. Функция текучести для изотропного нагружения f_c задается уравнением

$$f_c = \left(\frac{q^2}{\alpha^2} \right) - p^2 - p_p^2, \quad (2)$$

где α — параметр шатровой поверхности, зависящий от коэффициента бокового давления грунта и соотношения трехосного и компрессионного модулей;

p — среднее напряжение, кПа;

p_p — параметр шатровой поверхности, среднее напряжение предуплотнения, кПа.

В основу модели положены четыре эмпирических закона:

1) закон Гука для упругих деформаций;

2) степенная зависимость жесткости от напряжений в виде уравнений

$$E_{oed}^i = E_{oed}^{P_{ref}} \left(\frac{\sigma_i + c \cdot \cot \varphi}{P_{ref} + c \cdot \cot \varphi} \right)^m; \quad (3)$$

$$E_{50}^i = E_{50}^{P_{ref}} \left(\frac{\sigma_3 + c \cdot \cot \varphi}{P_{ref} + c \cdot \cot \varphi} \right)^m, \quad (4)$$

где E_{oed}^i и $E_{oed}^{P_{ref}}$ — компрессионные модули при расчетном давлении и при давлении, равном опорному, соответственно, кПа;

σ_i и σ_3 — расчетное давление для компрессионного и трехосного испытания соответственно, кПа;

c — удельное сцепление, кПа;

φ — угол внутреннего трения, град;

m — степенной параметр модели, определяющий рост жесткости с глубиной;

E_{50}^i и $E_{50}^{P_{ref}}$ — трехосные модули при расчетном давлении и при давлении, равном опорному, соответственно, кПа;

P_{ref} — опорное давление, кПа;

3) гиперболическая зависимость между деформациями и девиаторным напряжением

$$q = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_{0,i}} + \frac{\varepsilon}{q_f}}, \quad (5)$$

где ε — относительная деформация;

$E_{0,i}$ — трехосный модуль деформации, кПа;

q_f — предельное значение девиаторного напряжения, кПа;

4) связь между скоростью пластических деформаций объема и сдвига, определяемой переменным в ходе расчета значением угла дилатансии (по теории Рунд) [14],

$$\sin \psi_m = \frac{2\dot{\varepsilon}_v}{\dot{\varepsilon}_v - 2\dot{\varepsilon}_1}, \quad (6)$$

где ψ_m — мобилизованный угол дилатансии, град;

$\dot{\varepsilon}_v$ и $\dot{\varepsilon}_1$ — скорости объемной и осевой деформаций соответственно.

Дополнением модели является механизм повышения жесткости при малых деформациях (small strain) на основе зависимости Гардина — Дрневича [15]. Для моделирования приняты параметры модели HSS (табл. 1).

Таблица 1

Параметры модели Hardening Soil Small

E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	m	C	φ	ψ	$\gamma_{0,7}$	G_0^{ref}
30 МПа	30 МПа	150 МПа	0,5	0,2 кПа	30	0	$1 \cdot 10^{-4}$	70 МПа

Примечание. E_{ur}^{ref} — опорный модуль упругости, МПа; $\gamma_{0,7}$ — уровень сдвиговой деформации при 70 % снижении жесткости; G_0^{ref} — начальный модуль сдвига, МПа.

При моделировании контактного взаимодействия используется элемент interface. Шероховатость поверхности контакта моделируется путем подбора подходящей величины коэффициента снижения прочности R_{inter} .

Важным входным параметром является коэффициент трения частиц георешетки, который представляет собой взаимодействие между георешеткой и грунтом. В численных тестах он корректировался итеративно до тех пор, пока не были получены удовлетворительные результаты по сравнению с соответствующими экспериментальными данными. Коэффициент трения частиц георешетки найден в данном исследовании равным 1,0, и этот параметр использовался в дальнейшем численном анализе.

Граничные условия определены таким образом, что узлы вдоль вертикальных границ могут свободно перемещаться только в вертикальном направлении. Узлы в основании закреплены против смещений во всех направлениях. Расчетная схема представлена на рис. 5.

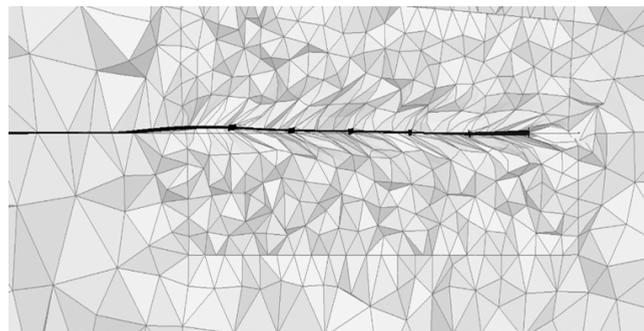


Рис. 5. Расчетная схема с треугольными элементами

Для сравнения на рис. 6 показаны зависимости перемещений от выдергивающих усилий, полученные в результате численного анализа и лабораторных испытаний, которые показывают относительно близкое совпадение.

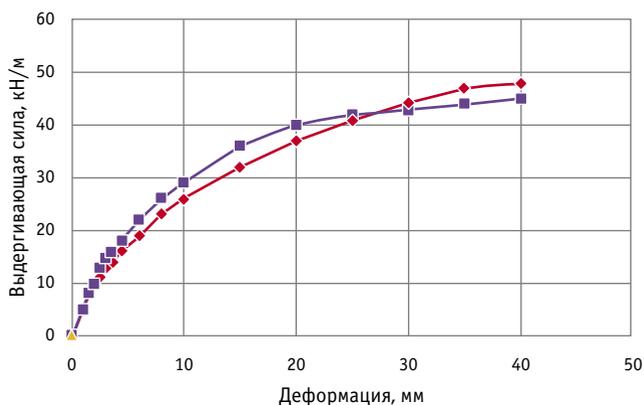


Рис. 6. Результаты испытания на выдергивание при вертикальной нагрузке 60 кПа:
 ■ — моделирование; ◆ — эксперимент

При малых перемещениях как численные, так и экспериментальные результаты были одинаковыми. Однако при смещениях более 10 мм данные начинали расходиться. Близость результатов показывает пригодность разработанной модели. Незначительные различия между ними объясняются помехами. Помехи возникают из-за повышенных напряжений перед поперечным ребром, поскольку пассивное сопротивление грунта постепенно мобилизуется и область низких напряжений формируется непосредственно за этими элементами, что снижает общее сопротивление грунта выдергиванию.

мируется непосредственно за этими элементами, что снижает общее сопротивление грунта выдергиванию.

Смещения и растягивающие усилия в георешетке, полученные в ходе численного анализа, показаны на рис. 7.

Во всех рассмотренных испытаниях максимальные растягивающие усилия возникали на нагруженных концах георешетки, а значения на свободных концах георешетки сводились практически к нулю. Сила натяжения постепенно уменьшалась от нагруженного к закрепленному концу, так как сила вытягивания вызвана только сопротивлением трения между элементами георешетки и грунтом. Результаты математического моделирования показывали схожую с лабораторным экспериментом картину распределения деформаций вдоль геосинтетического материала [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненными исследованиями продемонстрировано, что новая численная модель успешно описывает механизмы передачи нагрузки, взаимодействие геоматериала и грунта на микроуровне и что реакция модели соответствует опубликованным результатам измерений.

Приведенные в статье примеры показывают, что предложенный подход к моделированию геосинтетического материала в ограниченных грунтом условиях подходит для прогнозирования поведения механически стабилизированного подшпального основания.

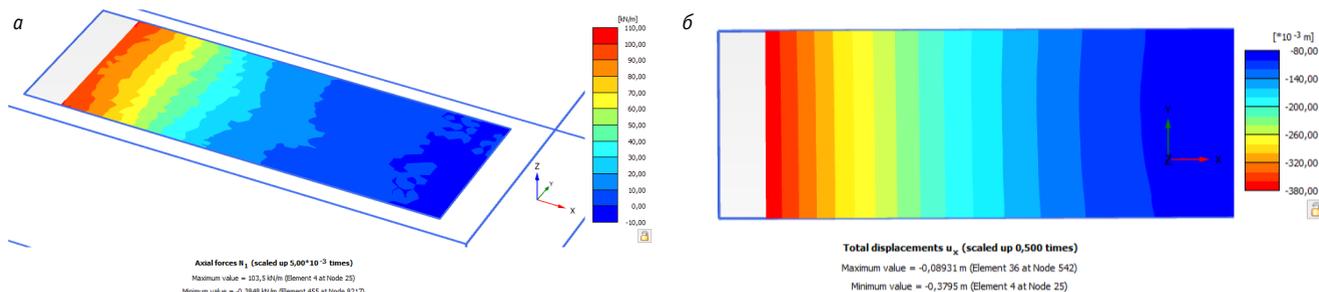


Рис. 7. Растягивающие усилия (а) и перемещения (б) в геоматериале

Литература

- Gobel C. H., Weisemann U. C., Kirschner R. A. Effectiveness of a reinforcing geogrid in a railway subbase under dynamic loads // *Geotextiles and Geomembranes*. 1994. Vol. 13. No. 2. Pp. 91–99. DOI: 10.1016/0266-1144(94)90041-8.
- Brown S. F., Kwan J., Thom N. H. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast // *Geotextiles and Geomembranes*. 2007. Vol. 25. No. 6. Pp. 326–335. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2007.06.003.
- Indraratna B., Ngo N. T., Rujikiatkamjorn C. Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling // *Geotextiles and Geomembranes*. 2011. Vol. 29. No. 3. Pp. 313–322. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2011.01.015.
- Petriaev A. Laboratory and Field Investigation of Railway Ballast, Stabilized by Geosynthetics // *Geotechnical Engineering in the XXI*

References

- Gobel C. H., Weisemann U. C., Kirschner R. A. Effectiveness of a reinforcing geogrid in a railway subbase under dynamic loads // *Geotextiles and Geomembranes*. 1994. Vol. 13. No. 2. Pp. 91–99. DOI: 10.1016/0266-1144(94)90041-8.
- Brown S. F., Kwan J., Thom N. H. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast // *Geotextiles and Geomembranes*. 2007. Vol. 25. No. 6. Pp. 326–335. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2007.06.003.
- Indraratna B., Ngo N. T., Rujikiatkamjorn C. Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling // *Geotextiles and Geomembranes*. 2011. Vol. 29. No. 3. Pp. 313–322. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2011.01.015.
- Petriaev A. Laboratory and Field Investigation of Railway Ballast, Stabilized by Geosynthetics // *Geotechnical Engineering in the XXI*

- ing in the XXI Century: Lessons learned and future challenges : Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE). IOS Press, 2019. Pp. 1611–1618. DOI: 10.3233/STAL190213.
5. Esmaili M., Zakeri J. A., Babaei M. Laboratory and field investigation of the effect of geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance // *Geotextiles and Geomembranes*. 2017. Vol. 45. No. 2. Pp. 23–33. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2016.11.003.
 6. Petriaev A. Modeling of a Railway Roadbed Reinforcement // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*. 2020. Vol. 2. Pp. 27–35. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_4.
 7. Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behavior during deformation / A. M. N. Alagiyawanna, M. Sugimoto, S. Sato, H. Toyota // *Geotextiles and Geomembranes*. 2001. Vol. 19. No. 8. Pp. 483–507. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00020-6.
 8. Hossain B., Hossain Z., Saka T. Interaction Properties of Geosynthetic with Different Backfill Soils // *International Journal of Geosciences*. 2012. 3. Pp. 1033–1039. DOI: 10.4236/ijg.2012.35104.
 9. Liu C. N., Ho Y.-H., Huang J. W. Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces // *Geotextiles and Geomembranes*. 2009. Vol. 27. No. 1. Pp. 19–30. DOI: 10.1016/J.GEOTEXMEM.2008.03.002.
 10. Biabani M. M., Indraratna B. An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes // *Geotextiles and Geomembranes*. 2015. Vol. 43. No. 3. Pp. 240–249. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.04.002.
 11. Федоренко Е. В., Фам Дык Тиеп. Сравнение вариантов определения псевдосцепления в армированном грунте // *Дороги и мосты*. 2017. Вып. 38. С. 218–230. ISSN 1815–896X.
 12. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: Formulation and verification // *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema, Rotterdam, 1999. Pp. 281–296. DOI: 10.1201/9781315138206-27.
 13. Пеньков Д. В., Федоренко Е. В. К вопросу получения исходных данных для модели грунта hardening soil // *Грунтоведение*. 2020. № 2 (15). С. 19–29. ISSN 2306–9139.
 14. Rowe P. W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1962. Vol. 269. Issue 1339. Pp. 500–527. DOI: 10.2307/2414551.
 15. Hardin B. O., Drnevich V. P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves // *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1972. 98 (6). Pp. 603–624. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0001756.
 16. Петряев А. В. Моделирование поведения геосинтетического материала в железнодорожном земляном полотне // *Транспорт Урала*. 2017. № 1 (52). С. 61–66. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-61-66. ISSN 1815–9400.
 - Century: Lessons learned and future challenges : Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE). IOS Press, 2019. Pp. 1611–1618. DOI: 10.3233/STAL190213.
 5. Esmaili M., Zakeri J. A., Babaei M. Laboratory and field investigation of the effect of geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance // *Geotextiles and Geomembranes*. 2017. Vol. 45. No. 2. Pp. 23–33. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2016.11.003.
 6. Petriaev A. Modeling of a Railway Roadbed Reinforcement // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*. 2020. Vol. 2. Pp. 27–35. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_4.
 7. Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behavior during deformation / A. M. N. Alagiyawanna, M. Sugimoto, S. Sato, H. Toyota // *Geotextiles and Geomembranes*. 2001. Vol. 19. No. 8. Pp. 483–507. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00020-6.
 8. Hossain B., Hossain Z., Saka T. Interaction Properties of Geosynthetic with Different Backfill Soils // *International Journal of Geosciences*. 2012. 3. Pp. 1033–1039. DOI: 10.4236/ijg.2012.35104.
 9. Liu C. N., Ho Y.-H., Huang J. W. Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces // *Geotextiles and Geomembranes*. 2009. Vol. 27. No. 1. Pp. 19–30. DOI: 10.1016/J.GEOTEXMEM.2008.03.002.
 10. Biabani M. M., Indraratna B. An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes // *Geotextiles and Geomembranes*. 2015. Vol. 43. No. 3. Pp. 240–249. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.04.002.
 11. Федоренко Е. В., Фам Дык Тиеп. Comparison of variations of pseudocoheesion determining in reinforced soil [Sravnenie variantov opredeleniya psevdostsepleniya v armirovannom grunte] // *Dorogi i mosty*. 2017. No. 38. Pp. 218–230. ISSN 1815–896X.
 12. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: Formulation and verification // *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema, Rotterdam, 1999. Pp. 281–296. DOI: 10.1201/9781315138206-27.
 13. Penkov D. V., Fedorenko E. V. On the issue of obtaining initial data for the soil model «hardening soil» [K voprosu polucheniya iskhodnykh dannykh dlya modeli grunta hardening soil] // *Gruntovedenie*. 2020. No. 2 (15). Pp. 19–29. ISSN 2306–9139.
 14. Rowe P. W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1962. Vol. 269. Issue 1339. Pp. 500–527. DOI: 10.2307/2414551.
 15. Hardin B. O., Drnevich V. P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves // *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1972. 98 (6). Pp. 603–624. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0001756.
 16. Petryaev A. V. Modeling of behavior of geosynthetic material on railway roadbed [Modelirovanie povedeniya geosinteticheskogo materiala v zheleznodorozhnom zemlyanom polotne] // *Transport of the Urals*. 2017. No. 1 (52). Pp. 61–66. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-61-66. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,72 авторских листа

УДК 656.084

Егор Викторович Голов, старший преподаватель кафедры транспортных систем Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия,

Сергей Аркадьевич Евтюков, доктор технических наук, профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия,

Алексей Павлович Андреев, магистрант кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия,

Елена Валерьевна Сорокина, магистрант кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛЕДОВОЙ БАЗЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ЕЕ ИНТЕГРАЦИЯ В МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННУЮ РЕКОНСТРУКЦИЮ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

Egor Viktorovich Golov, Senior Lecturer, Transport Systems Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia,

Sergey Arkadyevich Evtukov, DSc in Engineering, Professor, Land Transport and Technological Machines Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia,

Alexey Pavlovich Andreev, graduate student, Land Transport and Technological Machines Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia,

Elena Valeryevna Sorokina, graduate student, Land Transport and Technological Machines Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia

Creation of 3D spatial and tracking base of initial data with the use of scanning unmanned aerial vehicles and its integration into model-oriented reconstruction of traffic accidents

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме, связанной с последствиями аварийности на автомобильных дорогах, а также способам повышения качества проведения экспертизы дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Авторами выполнены исследования по использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с технологией 3D-сканирования, обеспечивающих качественный и высокоэффективный сбор исходных данных для проведения дорожно-транспортной экспертизы. Разработан алгоритм применения БПЛА для фиксации обстоятельств дорожно-транспортной ситуации на месте происшествия в трехмерном формате. Для верификации предложенного метода симулировано ДТП и создана трехмерная модель места происшествия при помощи БПЛА с технологией Lidar. Результаты исследований подтвердили, что использование БПЛА с технологией 3D-сканирования обеспечивает получение исчерпывающей информации, необходимой для проведения экспертизы ДТП.

Ключевые слова: дорожно-транспортные происшествия, экспертиза ДТП, реконструкция ДТП, аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, технологии 3D-сканирования.

Summary

The paper is devoted to an up-to-date problem connected with consequences of accident rate on roads and ways to increase a quality of carrying out an expertise of traffic accidents. The authors have carried out studies on the use of unmanned aerial vehicles (UAV) with the 3D-scanning technology that provides a high-quality and highly efficient collection of initial data for carrying out the expertise of traffic accidents. They have developed an algorithm of UAV application for the registration of traffic accident circumstances. For the verification of the proposed method the authors have simulated a traffic accident and created a 3D-model of a scene of the accident with the use of UAV with the Lidar technology. Results of the study confirmed that the use of UAV with the 3D-scanning technology provides the collection of comprehensive information needed for the expertise of a traffic accident.

Keywords: traffic accidents, expertise of traffic accidents, reconstruction of traffic accidents, aerial photography, unmanned aerial vehicle, 3D-scanning technology.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-74-79

По данным Всемирной организации здравоохранения, в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) в мире каждый день погибают свыше 3 тыс. чел. и около 100 тыс. чел. травмируются. Ежегодно в ДТП получают разные виды повреждений от 20 до 50 млн чел., а жертвами становятся более 1,25 млн чел. (из них 186 тыс. — дети), причем этот показатель остается практически неизменным с 2008 г.

Приведенная статистика показывает, что обеспечение безопасности дорожного движения — чрезвычайно актуальная и важная задача [1–8]. Особое внимание во всех странах мира уделяется такому направлению, как сокращение смертности от дорожно-транспортного травматизма. Для контроля за соблюдением установленных режимов движения в качестве эффективного инструмента используют реконструкцию ДТП. А внедрение современных технологий становится одним из обязательных методов развития и повышения качества проведения экспертизы по делам о ДТП. В частности, в рамках модельно-ориентированной реконструкции (МОР) можно выделить такое перспективное направление, как использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с технологией 3D-сканирования.

Пространственно-следовая информация (ПСИ), применяемая вне концепции МОР, часто бывает низкого качества и практически непригодной для проведения циклов моделирования без дополнительных смежных видов исследований и процедур обследования в них. Так, нередко ситуации, когда в фотоматериалах с места ДТП обнаруживаются следы на проезжей части, которых в первичном материале (протоколе осмотра места ДТП и на схеме ДТП к нему) нет либо они зафиксированы неполноценно (например, дугообразные следы юза нанесены как линейные и/или отсутствуют размеры привязки следов к краям проезжей части).

В рамках МОР фотограмметрическая обработка фото- и видеоизображений позволяет не только устранить любые неточности, допущенные при первичном осмотре, но и сформировать пригодные для реализации модели опорные масштабные планы, которые полностью воспроизводят локализации деформаций транспортных средств и ПСИ на месте ДТП [9–13].

При возникновении ДТП на автомобильных дорогах образуются заторы [14], которые мешают беспрепятственному движению транспортных средств. В подобных ситуациях сотрудники ГИБДД не имеют возможности быстро прибыть на место происшествия и провести все необходимые мероприятия, и, для того чтобы возобновить нормальный режим движения транспортного потока, требуется продолжительное время, нередко до 2–3 ч.

Осмотр места дорожно-транспортного происшествия — один из важнейших этапов, предшествующих проведению экспертизы ДТП. Осмотр выполняется для восстановления механизма дорожно-транспортного происшествия, выявления деформаций транспортных средств, определения их технического и механического состояния. Этот процесс включает в себя также обязательный этап фотофиксации.

Возможности использования БПЛА с целью наблюдения и контроля за дорожным движением изучаются в России и за рубежом с начала XXI в. К настоящему времени разработаны БПЛА для мониторинга дорожных сетей, определения ин-

тенсивности на автомобильных дорогах, фиксации нарушений ПДД, поиска транспортных средств, которые числятся в угоне, и сбора информации о ДТП. Наиболее широкое применение среди БПЛА российского производства получили вертолет «Ворон», БЛА ZALA 421–04, коптер ZALA 42121 «Серафим» [15–18].

Создание 3D-моделей возможно на основе использования технологии Lidar, пример сканирования транспортного средства при помощи данной технологии представлен на рис. 1.



Рис. 1. 3D-модель деформированного автомобиля, созданная с использованием технологии Lidar

Для сокращения потерь времени и повышения точности измерений при первичных следственных действиях на месте происшествия предлагается использовать беспилотные летательные аппараты и технологию 3D-сканирования в совокупности, т.е. создавать трехмерные модели при помощи сканирующих устройств, установленных на БПЛА.

Использование БПЛА с технологией 3D-сканирования позволяет зафиксировать обстановку на месте дорожно-транспортного происшествия с высокой точностью и провести качественную и подробную реконструкцию механизма ДТП. Внедрение в практику предложенного метода увеличивает потенциал в решении проблемы своевременного приезда служб для осмотра места дорожно-транспортного происшествия и фиксации обстоятельств, имеющих значение для последующей экспертизы. Использование в подобных ситуациях беспилотных летательных аппаратов с технологией 3D-сканирования дает возможность за короткий срок произвести качественную фиксацию не только всего места происшествия, но и состояния транспортных средств, участвовавших в ДТП [5, 19–21].

При изучении данного перспективного метода был разработан алгоритм применения БПЛА с технологией создания трехмерных моделей для фиксации обстоятельств дорожно-транспортной ситуации на месте происшествия (рис. 2).

Для проверки предлагаемого метода сотрудниками автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) выполнено исследование с использованием представленного на рис. 2 алгоритма: симулировано дорожно-транспортное происшествие (по месту нахождения СПбГАСУ), выбрано место базирования БПЛА (главный корпус СПбГАСУ), осуществлено перемещение БПЛА от места базирования к месту происшествия (маршрут перемещения БПЛА представлен на рис. 3), на БПЛА установлен прибор для сканирования с технологией Lidar.



Рис. 2. Алгоритм работы БПЛА при фиксации дорожно-транспортного происшествия

В смоделированном ДТП участвовали автомобили Mitsubishi L200 и Kia Ceed. Имитация места происшествия и положение транспортных средств представлены на рис. 4 (снимки сделаны с беспилотно-го летательного аппарата).

По прибытии БПЛА на место ДТП 3D-сканирование выполнено в следующей последовательности (рис. 5):

1) облет места происшествия по траектории А (на высоте 700 мм от опорной поверхности);



Рис. 3. Маршрут БПЛА:

I — место базирования; II — место имитируемого ДТП



Рис. 4. Имитация ДТП:

а — расположение машин на месте ДТП (ортогональной вид); б — вид со стороны автомобиля Kia Ceed; в — вид со стороны автомобиля Mitsubishi L200; г — зона имитации непосредственного контакта автомобилей

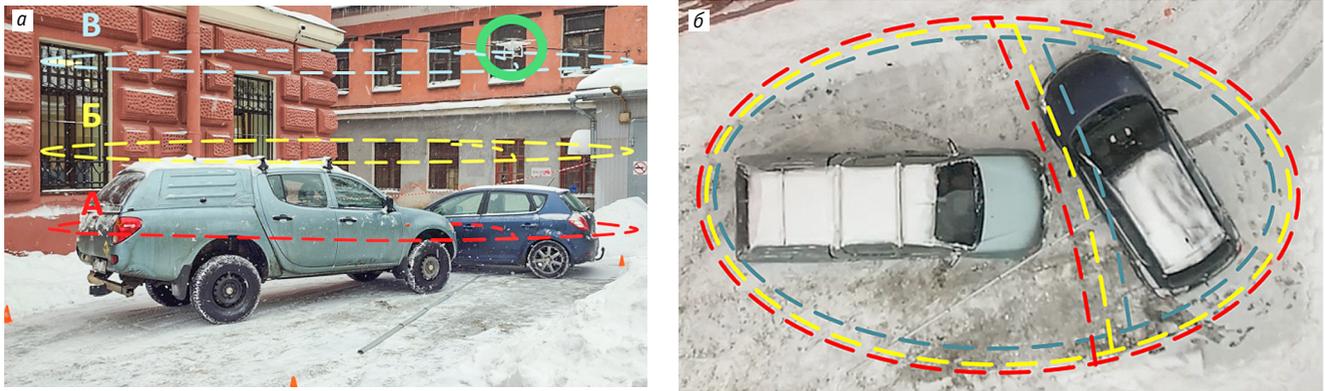


Рис. 5. Траектории движения БПЛА при создании трехмерной модели ДТП:
а — вид сбоку; б — вид сверху



Рис. 6. 3D-модель места происшествия

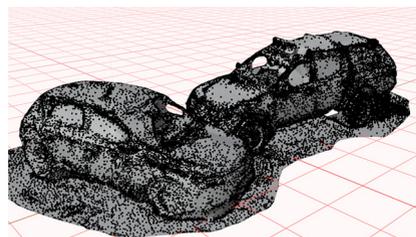


Рис. 7. 3D-модель места происшествия в виде облака точек

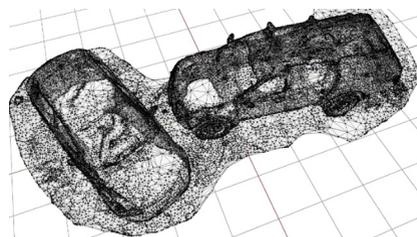


Рис. 8. 3D-модель места происшествия в виде сетки



Рис. 9. 3D-модель локализации деформаций автомобиля Kia Seed



Рис. 10. Следы транспортного средства в 3D-модели места происшествия

2) облет места происшествия по траектории Б (на высоте 2000 мм от опорной поверхности);

3) облет места происшествия по траектории В (на высоте 4000 мм от опорной поверхности).

После завершения съемки и сканирования места происшествия беспилотный летательный аппарат был отправлен на место базирования, где оператор перенес полученные данные с БПЛА на персональный компьютер. В результате обработки создана 3D-модель места происшествия (рис. 6–10).

Обработка данных в программе, предназначенной для трехмерных моделей, показала идентичность созданной 3D-модели действительным параметрам обстоятельств дорожно-транспортной ситуации (например, значения расстояний определены с точностью до 0,001 м). Для проверки качества измерений, произведенных по 3D-модели, на месте имитации ДТП была установлена телескопическая измерительная линейка (рис. 11). Результаты измерения ее трехмерной модели соответствовали параметрам, указанным в свидетельстве о проверке, кроме того, действительные габаритные размеры автомобилей, участвовавших в имитации ДТП, совпали с параметрами их трехмерных моделей [14, 22].

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что представленный метод создания банка исходных данных для последующей реконструкции ДТП при помощи БПЛА с технологией 3D-сканирования необходим для применения в процессе сбора



Рис. 11. Размер телескопической измерительной линейки в программе для трехмерного моделирования

пространственно-следовой информации при дорожно-транспортной экспертизе. В дальнейшем планируется проведение аналогичных экспериментов с последующей апробацией в условиях реальных ДТП.

Внедрение результатов выполненного исследования в практическую деятельность позволит значительно ускорить про-

цесс фиксации обстоятельств на месте происшествия и повысить качество исходной информации для дальнейшего изучения экспертами факта ДТП. Кроме того, разработанный метод может быть успешно интегрирован в модельно-ориентированную реконструкцию на стадии формирования объема входной информации, подлежащей комплексному исследованию.

Литература

1. Global status report on road safety. URL: <https://www.who.int/> (дата обращения: 14.11.2021).
2. Indicators of Road Safety as a Phenomenon of National Security of the State / A. Kvitchuk, M. Kvitchuk, S. Evtuykov, E. Golov // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 247. Pp. 159–168. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_16.
3. Kurakina E., Evtiukov S., Ginzburg G. Systemic indicators of road infrastructure at accident clusters // Architecture and Engineering. 2020. Vol. 5. No. 1. Pp. 51–58. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-51-58.
4. Голов Е. В. Фактор скорости в системе безопасности дорожного движения // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 139–148. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-139-148. ISSN 1999-5571.
5. Добромиров В. Н., Евтюков С. С., Куракина Е. В. Совершенствование методов оценки безопасности дорожного движения на скоростных автомобильных дорогах // Мир транспорта и технологических машин. 2017. № 1 (56). С. 94–100. ISSN 2073-7432.
6. Евтюков С. С., Голов Е. В. Аудит безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах регионального значения в Ленинградской области // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 85–89. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-85-89. ISSN 1815-9400.
7. Евтюков С. С., Голов Е. В., Коломеец А. А. Роль человеческого фактора при возникновении дорожно-транспортного происшествия // Транспортное дело России. 2019. № 2 (141). С. 196–199. ISSN 2072-8689.
8. Медрес Е. Е., Голов Е. В., Бабенко Т. И. Факторы, влияющие на равномерность движения автомобильного транспорта в условиях насыщенных транспортных потоков // Транспортное дело России. 2017. № 2 (129). С. 89–90. ISSN 2072-8689.
9. Куракина Е. В., Рязанов С. В. Комплексный анализ аварийности и причин ухудшения дорожно-транспортной обстановки // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 189–196. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-189-196. ISSN 1999-5571.

References

1. Global status report on road safety. URL: <https://www.who.int/> (access date: 14.11.2021).
2. Indicators of Road Safety as a Phenomenon of National Security of the State / A. Kvitchuk, M. Kvitchuk, S. Evtuykov, E. Golov // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 247. Pp. 159–168. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_16.
3. Kurakina E., Evtiukov S., Ginzburg G. Systemic indicators of road infrastructure at accident clusters // Architecture and Engineering. Vol. 5. No. 1. Pp. 51–58. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-51-58.
4. Golov E. V. Speed factor in the road safety system [Faktor skorosti v sisteme bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya] // Bulletin of Civil Engineers. 2021. No. 3 (86). Pp. 139–148. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-139-148. ISSN 1999-5571.
5. Dobromirov V. N., Evtuykov S. S., Kurakina E. V. Improving safety assessment methods of traffic on high-speed roads [Sovershenstvovanie metodov otsenki bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na skorostnykh avtomobil'nykh dorogakh] // World transport and technological machinery. 2017. No. 1 (56). Pp. 94–100. ISSN 2073-7432.
6. Evtuykov S. S., Golov E. V. Road traffic safety audit on roads of regional importance in Leningrad region [Audit bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh regional'nogo znacheniya v Leningradskoy oblasti] // Transport of the Urals. 2017. No. 2 (53). Pp. 85–89. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-85-89. ISSN 1815-9400.
7. Evtuykov S. S., Golov E. V., Kolomeets A. A. The role of a human factor at formation of the traffic accident [Rol' chelovecheskogo faktora pri vozniknovenii dorozhno-transportnogo proisshestiya] // Transport business of Russia. 2019. No. 2 (141). Pp. 196–199. ISSN 2072-8689.
8. Medres E. E., Golov E. V., Babenko T. I. The factors influencing uniformity of the movement of the motor transport in the conditions of saturated transport streams [Faktory, vliyayushhie na ravnomernost' dvizheniya avtomobil'nogo transporta v usloviyakh nasyshhennykh transportnykh potokov] // Transport business of Russia. 2017. No. 2 (129). Pp. 89–90. ISSN 2072-8689.
9. Kurakina E. V., Ryazanov S. V. Comprehensive analysis of accident rate and causes of complication of road traffic situation [Kompleksnyy analiz avariynosti i prichin ukhudsheniya dorozhno-transportnoy obstanovki] // Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 4 (81). Pp. 189–196. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-189-196. ISSN 1999-5571.

10. Куракина Е. В. Об эффективности проведения исследований мест концентрации ДТП // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 231–237. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-2-231-237. ISSN 1999–5571.
11. Куракина Е. В., Склярова А. А. Повышение уровня безопасности дорожного движения в системе «участник дорожного движения — транспортное средство — дорога — внешняя среда» // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17. № 4 (74). С. 488–499. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499. ISSN 2071–7296.
12. Марусин А. В., Марусин А. В. Рекомендации по развитию систем автоматической фиксации нарушений ПДД в Российской Федерации на среднесрочный период 2018–2023 гг. // О мерах по повышению безопасности дорожного движения на среднесрочный период планирования (2018–2023 годы) : сборник докладов. Москва : МАДИ, 2017. С. 132–139.
13. Терентьев А. В., Евтюков С. С. Объектно-ориентированные модели управления — основа цифровой транспортной логистики // Грузовик. 2019. № 8. С. 32–35. ISSN 1684–1298.
14. Яндекс.Пробки. URL: <https://yandex.ru/> (дата обращения: 14.11.2021).
15. Добромиров В. Н., Евтюков С. С., Голов Е. В. Современные технологии первичного осмотра места дорожно-транспортного происшествия // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 232–239. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-2-232-239. ISSN 1999–5571.
16. Использование беспилотных летательных аппаратов при экспертизе ДТП и введении ограничений скоростного режима / Д. А. Стрижевский, А. В. Кочетков, Л. В. Янковский [и др.] // Транспорт: проблемы и перспективы : сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию транспортного образования в Зауралье / Под общ. ред. В. В. Харина. Курган : КИЖТ, 2017. С. 110–113.
17. Справцева Е. В. Применение квадрокоптеров в ГИБДД // Технические науки — от теории к практике. 2017. № 3 (63). С. 136–140. ISSN 2308–5991.
18. Сретенцев А. Н., Бадиков Д. А. Некоторые аспекты использования современных технических средств фиксации при осмотре места дорожно-транспортного происшествия // Среднерусский вестник общественных наук. 2014. № 4 (34). С. 79–82. ISSN 2071–2367.
19. Evtukov S., Golov E., Sazonova T. Prospects of scientific research in the field of active and passive safety of vehicles // MATEC Web of Conferences. Novosibirsk : EDP Sciences, 2018. P. 04018. DOI: 10.1051/mateconf/201823904018.
20. Evtukov S. S., Golov E. V., Ivanov N. A. Innovative safety systems for modern vehicles // T-Comm. 2019. Vol. 13. No. 6. Pp. 71–76. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10283.
21. Голов Е. В., Евтюков С. С., Васильев Я. В. Дифференцирование жесткости передней части автомобиля // Информационные технологии и инновации на транспорте : материалы VI Международной научно-практической конференции // Под общ. ред. А. Н. Новикова. Орел : Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, 2020. С. 293–299.
22. Якимов А. Ю. Независимая техническая экспертиза транспортных средств // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах : материалы 8-й международной конференции. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2008.
10. Kurakina E. V. On the effectiveness of studies carried out at places of road traffic accident concentration [Ob effektivnosti provedeniya issledovaniy mest kontsentratsii DTP] // Bulletin of Civil Engineers. 2018. No. 2 (67). Pp. 231–237. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-2-231-237. ISSN 1999–5571.
11. Kurakina E. V., Sklyarova A. A. Road safety improvement in road traffic participant — vehicle — road — external environment system [Povyseniye urovnya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v sisteme «uchastnik dorozhnogo dvizheniya — transportnoye sredstvo — doroga — vneshnyaya sreda»] // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020. Vol. 17. No. 4 (74). Pp. 488–499. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499. ISSN 2071–7296.
12. Marusin A. V., Marusin A. V. Guidelines on development of automatic traffic enforcement system in the Russian Federation for the mid-range period of 2018–2023 [Rekomendatsii po razvitiyu sistem avtomaticheskoy fiksatsii narusheniy PDD v Rossiyskoy Federatsii na srednesrochnyy period 2018–2023 gg.] // On measures aimed at increase of traffic safety for the midrange planning period (2018–2023) : book of abstracts. Moscow : MADi, 2017. Pp. 132–139.
13. Terentyev A. V., Evtyukov S. S. Objectoriented control models — the basis of digital transport logistics [Ob'ektno-orientirovannye modeli upravleniya — osnova tsifrovoy transportnoy logistiki] // Gruzovik. 2019. No. 8. Pp. 32–35. ISSN 1684–1298.
14. Yandex.Traffic jams. URL: <https://yandex.ru/> (access date: 14.11.2021).
15. Dobromirov V. N., Evtyukov S. S., Golov E. V. Modern technologies of the primary inspection of the road accident place [Sovremennyye tekhnologii pervichnogo osmotra mesta dorozhno-transportnogo proisshestviya] // Bulletin of Civil Engineers. 2017. No. 2 (61). Pp. 232–239. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-2-232-239. ISSN 1999–5571.
16. The use of unmanned aerial vehicles for expertise of traffic accidents and introduction of speed limitations [Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri ekspertize DTP i vvedenii ogranicheniy skorostnogo rezhima] / D. A. Strizhevskiy, A. V. Kochetkov, L. V. Yankovskiy [et al.] // Transport: problems and prospects : proceedings of the International research and practice conference dedicated to 90th anniversary of transport education in the Zauralye / Ed. by V. V. Kharin. Kurgan : KIRT, 2017. Pp. 110–113.
17. Spravtseva E. V. The use of quadcopters in the State Inspection of Road Safety [Primeneniye kvadrokoptero v GIBDD] // Engineering sciences — from theory to practice. 2017. No. 3 (63). Pp. 136–140. ISSN 2308–5991.
18. Sretentsev A. N., Badikov D. A. Some aspects of modern technical means of fixation for inspection of the scene of road traffic accident [Nekotorye aspekty ispol'zovaniya sovremennykh tekhnicheskikh sredstv fiksatsii pri osmotre mesta dorozhno-transportnogo proisshestviya] // Central Russian Journal of Social Sciences. 2014. No. 4 (34). Pp. 79–82. ISSN 2071–2367.
19. Evtukov S., Golov E., Sazonova T. Prospects of scientific research in the field of active and passive safety of vehicles // MATEC Web of Conferences. Novosibirsk : EDP Sciences, 2018. P. 04018. DOI: 10.1051/mateconf/201823904018.
20. Evtukov S. S., Golov E. V., Ivanov N. A. Innovative safety systems for modern vehicles // T-Comm. 2019. Vol. 13. No. 6. Pp. 71–76. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10283.
21. Golov E. V., Evtyukov S. S., Vasilyev Ya. V. Differentiating the stiffness of the front of the car [Differentsirovaniye zhestkosti peredney chasti avtomobilya] // Information technologies and innovations on transport : proceedings of the 6th International research and practice conference // Ed. by A. N. Novikov. Orel : Orel State University named after I. S. Turgenev, 2020. Pp. 293–299.
22. Yakimov A. Yu. Organization and traffic safety management in large cities [Nezavisimaya tekhnicheskaya ekspertiza transportnykh sredstv] // Traffic management and safety in big cities : proceedings of the 8th International conference. St. Petersburg : SPbGASU, 2008.

УДК 621.372.21

Татьяна Владимировна Ковалева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Александр Анатольевич Комяков, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Ольга Олеговна Комякова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Наталья Викторовна Пашкова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Tatyana Vladimirovna Kovaleva, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Alexander Anatolyevich Komyakov, DSc in Engineering, Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Olga Olegovna Komyakova, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Natalya Viktorovna Pashkova, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Analysis of wave processes in alternating current traction power system on the basis of simulation modeling

Аннотация

Волновые процессы отрицательно сказываются на потерях энергии и приводят к возникновению аварийных ситуаций в системе тягового электроснабжения. Для повышения энергетической эффективности, улучшения качества электроэнергии, обеспечения бесперебойной работы систем электроснабжения необходим комплексный подход к анализу волновых процессов в системе, включающей не только тяговую сеть, но и линии электропередачи и электроподвижной состав. Модель, созданная в среде SimInTech, позволяет проводить исследования при многовариантных режимах функционирования системы электроснабжения переменного тока с тяговой нагрузкой, учитывая волновые процессы.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, тяговая сеть переменного тока, волновые процессы, имитационное моделирование, среда SimInTech.

Summary

Wave processes negatively affect energy losses and lead to appearance of emergency situations in traction power supply system. In order to increase energy efficiency, to improve quality of energy and to provide uninterrupted operation of power supply systems there is a need in a comprehensive approach to the analysis of wave processes in the system that includes not only the traction power system but also power transmission lines and electric motive power. A model created in the SimInTech environment allows carrying out studies at multivariate modes of operation of the alternating current traction power supply system with traction load with the consideration for wave processes.

Keywords: railway transport, alternating current traction power system, wave processes, simulation modeling, SimInTech environment.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается тенденция физического старения устройств электроэнергетической инфраструктуры и снижения надежности их работы. Поэтому сокращение потребления энергии электроподвижным составом, совершенствование технических средств и технологий, повышение надежности работы инфраструктуры энергообеспечения перевозок входят в число основных направлений инновационной деятельности ОАО «РЖД» [1].

В частности, ежегодно выделяются средства на развитие и реконструкцию объектов электроэнергетической инфраструктуры (контактной сети, тяговых подстанций) и электрификацию новых участков. Для проектирования новых участков электрических железных дорог и инновации существующих выполняются электроэнергетические расчеты системы тягового электроснабжения [2].

К крупным инновационным проектам ОАО «РЖД» следует отнести и управление электроэнергетической инфраструктурой на базе информационных технологий. Внедрение информационных систем, основанных на предварительно разработанных математических моделях, позволяет повысить программно-технический уровень технологий, используемых на предприятиях железнодорожного транспорта не только в России, но и во всем мире [3, 4].

Структурная схема системы электроснабжения железных дорог переменного тока состоит из соединения блоков, содержащих линии электропередачи, тяговую сеть, тяговые подстанции и электровазы (элементы с распределенными и сосредоточенными параметрами) [5].

Свойства элементов с распределенными параметрами (линии электропередачи, тяговая сеть) становятся причиной стационарных волновых процессов, ухудшающих качество напряжения и тока [6].

Резкие изменения напряжения и тока в цепях электроваза, обусловленные работой преобразователей, приводят к появлению нестационарных волновых процессов. Возникающие при этом затухающие прямые и обратные волны тока и напряжения в тяговой сети отражаются от мест подключения объектов электроэнергетической инфраструктуры, в частности тяговых трансформаторов [7–9].

В тяговой сети и линиях электропередачи наряду со стационарными протекают нестационарные волновые процессы, обусловленные работой электроваза. В гармоническом спектре тока тяговой сети возникают нечетные гармоники, которые приводят к появлению дополнительного мешающего влияния на смежные устройства системы электроснабжения [10, 11].

Расчет и измерение напряжения и тока в различных точках тяговой сети необходимы для разработки мероприятий, направленных на уменьшение обусловленных волновыми процессами потерь электрической энергии и на повышение ее качества.

В системе электроснабжения переменного тока из-за волновых процессов возникают резонансы напряжения и тока. Они отрицательно влияют на работу различных устройств, приводят к перенапряжениям в точках подключения токоприемника электроваза, увеличению помех в рельсовых цепях на высоких частотах, а также к сбою в работе фильтрокомпенсирующих устройств [12–15].

СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УЧАСТКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В основе создания модели лежит структурная схема системы тягового электроснабжения переменного тока, состоящая из последовательного включения активных и пассивных четырехполюсников, каждый из которых замещает элемент этой системы: линию электропередачи, тяговую подстанцию, контактную сеть, электроваз.

Для всех четырехполюсников задаются параметры и математический аппарат, позволяющий описать происходящие электромагнитные процессы. Четырехполюсники, замещающие длинные линии (тяговую сеть, линии электропередачи), характеризуются первичными параметрами на единицу длины. Процессы в них описываются дифференциальными уравнениями (телеграфными уравнениями).

Исследование цепей с распределенными параметрами на лабораторных установках не может корректно отобразить все процессы, происходящие в длинных линиях (отражение и затухание волн).

Математическое моделирование для экспериментальных исследований является безопасным и универсальным инструментом, позволяющим заменить реальные устройства элек-

трических схем имитационными моделями и наглядно представить результаты.

Электромагнитные процессы в системе электроснабжения переменного тока можно исследовать в программной среде MathCAD с помощью математической модели, в основу которой положены дифференциальные уравнения. Созданная модель позволяет получить временные и пространственные зависимости тока и напряжения.

Среда динамического моделирования SimInTech предназначена для создания имитационных комплексных моделей динамики объектов. Использование подобных моделей особенно актуально при изучении нестационарных волновых процессов, обусловленных движущимся электроподвижным составом.

В этой среде создана модель тяговой сети переменного тока, состоящая из отдельных четырехполюсников, соединенных последовательно. Каждый четырехполюсник заменяет участок линии определенной длины. После каждого четырехполюсника установлены идеальные вольтметры, которые фиксируют действующие значения напряжений (рис. 1).

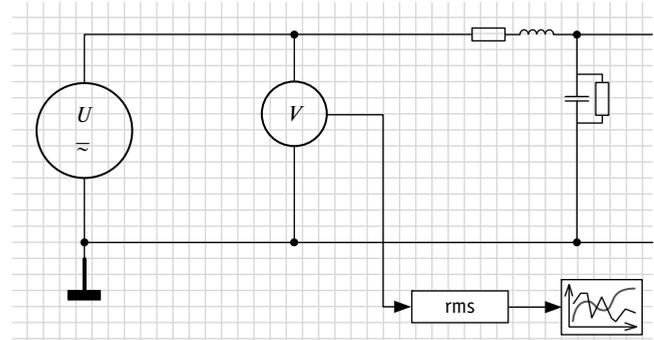


Рис. 1. Элемент модели длинной линии в среде динамического моделирования SimInTech

В библиотеке программы SimInTech создан специальный блок «Линия электропередачи» (рис. 2), заменяющий элементарный участок длинной линии, который представлен четырехполюсником на рис. 1.

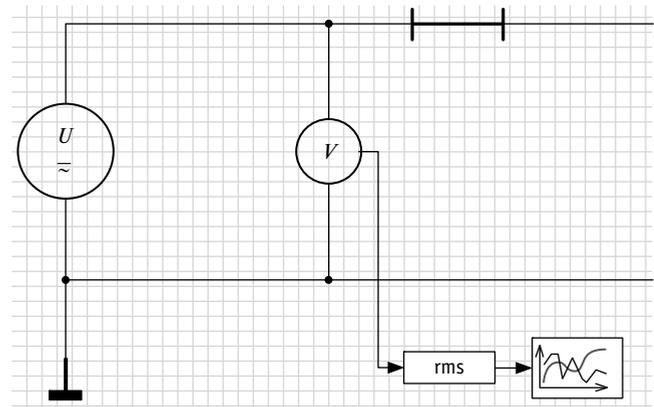


Рис. 2. Элемент модели длинной линии в среде динамического моделирования SimInTech с блоком «Линия электропередачи»

Сравнение различных вариантов результатов исследования (1 — расчет в среде MathCAD, 2 — моделирование в среде SimInTech с представлением элемента линии в виде четырехполюсника, 3 — моделирование в среде SimInTech с блоком «Линия электропередачи») распределения напряжения вдоль пространственной координаты x , отсчитываемой от начала участка линии, приведено в табл. 1. Исследование выполнено при синусоидальном входном напряжении, одинаковых параметрах и характере нагрузки, выбранных произвольно. Расхождение результатов моделирования по второму и третьему вариантам относительно расчетов в среде MathCAD оценивается по значениям относительных погрешностей — соответственно δ_1 и δ_2 .

Таблица 1

Сравнение значений напряжения вдоль линии при различных вариантах исследования

x , км	Значения напряжения при различных вариантах исследования, В			δ_1 , %	δ_2 , %
	1	2	3		
0	29,91	30,91	30,91	3,33	3,34
10	30,13	32,28	31,43	7,14	4,35
20	29,24	32,38	30,71	10,75	5,05
30	27,33	31,19	28,83	14,15	5,50
40	24,57	28,83	25,93	17,35	5,54
50	21,28	25,51	22,32	19,89	4,91
60	17,96	21,60	18,55	20,26	3,23
70	15,43	17,77	15,42	15,18	0,08
80	14,67	15,09	14,23	2,88	2,97
90	16,06	14,80	15,62	7,86	2,75
100	18,94	17,09	18,83	9,73	0,60
110	22,32	20,82	22,62	6,69	1,37
120	25,49	24,76	26,19	2,84	2,76
130	28,01	28,24	29,02	0,79	3,59
140	29,62	30,82	30,82	4,04	4,03
150	30,18	32,24	31,42	6,85	4,18

Как видно из табл. 1, результаты трех способов исследования дают практически одинаковый результат.

Чтобы оценить однородность полученных выборок, выполнено их сравнение. Для этого использован критерий Манна — Уитни (двусторонний критерий Вилкоксона). Критерий основан на нахождении статистики W , которая определяется через сумму рангов эталонной выборки по данным MathCAD (R_1) и выборки по данным SimInTech (R_2) относительно общего вариационного ряда [16]:

$$\begin{cases} w_1 = nm + \frac{n(n+1)}{2} - R_1; \\ w_2 = nm + \frac{m(m+1)}{2} - R_2; \\ W = \min(w_1, w_2). \end{cases} \quad (1)$$

Значение критерия Вилкоксона вычисляется по выражению

$$Z = \frac{W - \frac{1}{2}nm}{\sqrt{\frac{1}{12}nm(n+m+1)}}, \quad (2)$$

где m, n — объем выборок.

Результаты расчета показали, что наблюдаемое значение критерия при использовании блока «Линия электропередачи» из библиотеки SimInTech ($Z = 0,64$) меньше, чем при моделировании с помощью последовательно включенных четырехполюсников ($Z = 0,98$), т.е. первая выборка ближе к эталонной. Но при этом в обоих случаях наблюдаемые значения меньше критического ($Z = 1,96$ для уровня значимости 0,05), что говорит о хороших результатах имитационного моделирования. На основании проведенных исследований в дальнейшем используется блок «Линия электропередачи» из библиотеки SimInTech.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ УЧАСТКА ТЯГОВОЙ СЕТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ ПИТАЮЩЕМ НАПРЯЖЕНИИ

Экспериментальные исследования, проведенные на реальных электрифицированных участках тяговой сети переменного тока, позволили сформировать гармонический спектр питающего напряжения. Для оценки формы заданного в модели напряжения на выход источника несинусоидального напряжения был подключен осциллограф и получена кривая, представленная на рис. 3.

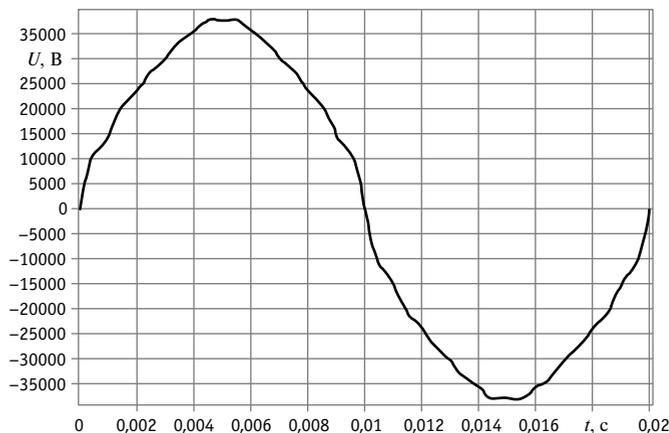


Рис. 3. Форма кривой питающего напряжения

Для исследования распределения напряжения вдоль участка тяговой сети разработана модель с несинусоидальным напряжением в среде SimInTech (рис. 4).

Для оценки работоспособности этой модели выполнено сравнение результатов моделирования в SimInTech и расчета в MathCAD при одинаковых параметрах и характере нагрузки (электровоз представлен в виде активно-индуктивной нагрузки). Электровоз находился в конце участка с односторонним питанием. Оценка значений гармонических составляющих напря-

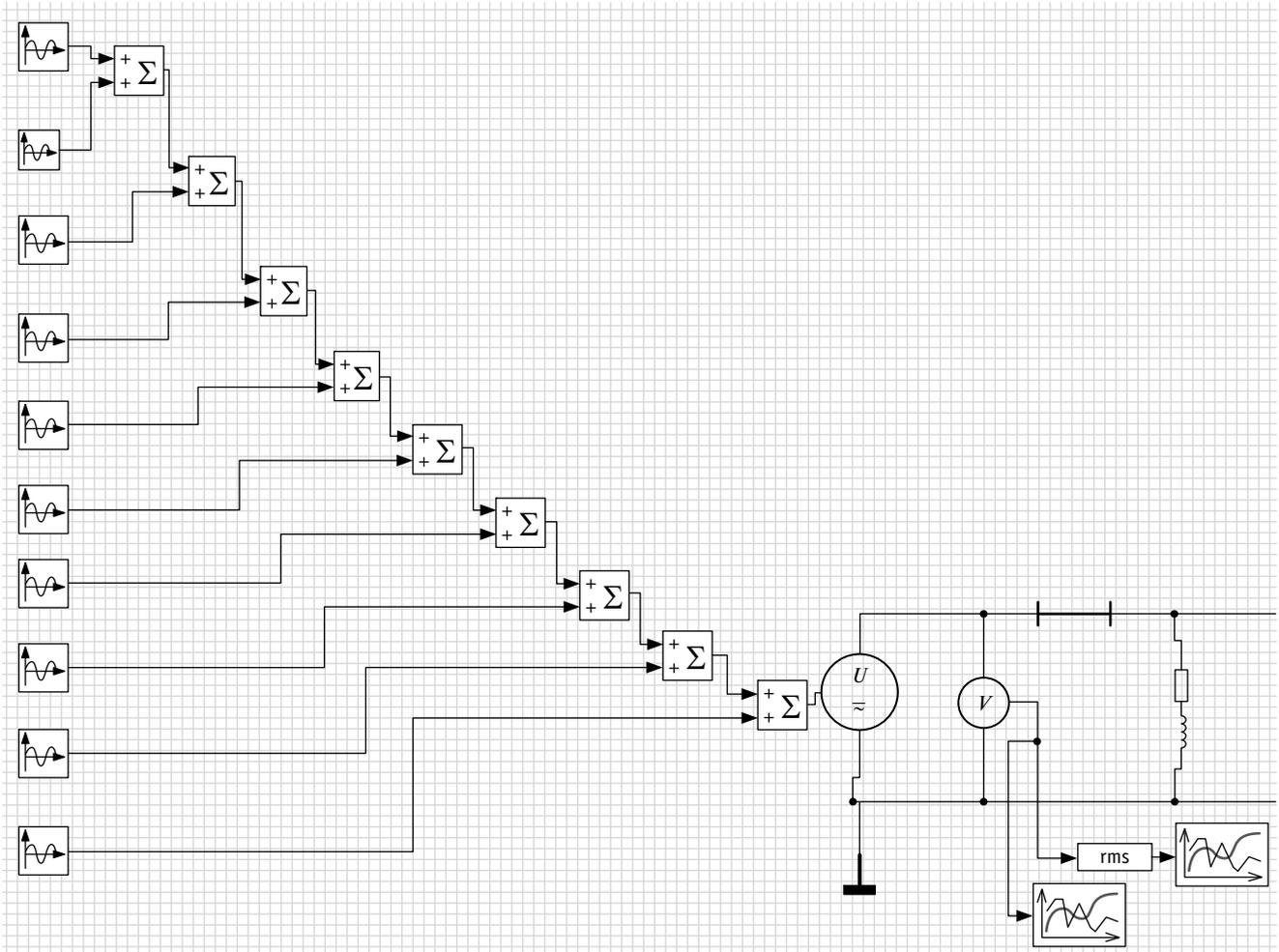


Рис. 4. Элемент модели тяговой сети с блоком «Линия электропередачи»

жения производилась в начале ($x = 0$ км), середине ($x = 7$ км) и в конце ($x = 15$ км) исследуемого участка тяговой сети.

Результаты исследования показали удовлетворительную сходимость моделирования в SimInTech и расчета в MathCAD. Математическое ожидание относительной погрешности составило $(0,158 \pm 0,109)\%$ для доверительной вероятности 0,95, а закон распределения регрессионных остатков близок к нормальному (рис. 5).

Полученный закон распределения имеет короткий «хвост» в отрицательной области, это говорит о том, что SimInTech незначительно завышает расчетные значения напряжения в сравнении с MathCAD. Скорее всего, данный недостаток может быть устранен за счет увеличения числа наблюдений.

Таким образом, как показали экспериментальные исследования, среда

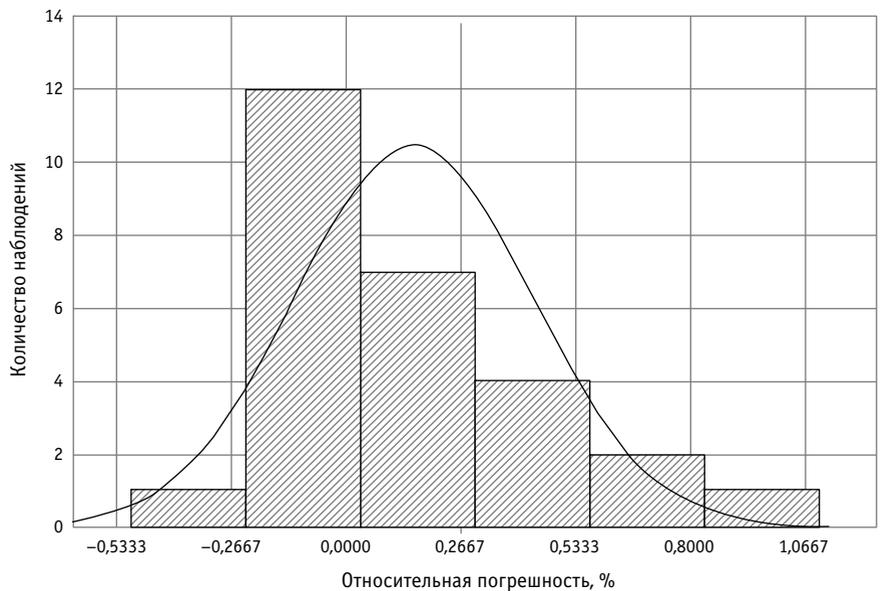


Рис. 5. Закон распределения регрессионных остатков

SimInTech может применяться для имитационного моделирования волновых процессов на участках переменного тока. В России на таких участках основной является схема двустороннего питания тяговой сети, что отмечено в нормах на проектирование. Поэтому авторами разработана модель тяговой сети переменного тока с двусторонним питанием — источники несинусоидального напряжения (см. рис. 4) подключены с двух сторон участка тяговой сети. Модель позволяет проанализировать распределение напряжения, в том числе для различных гармоник, при перемещении электровоза вдоль участка тяговой сети.

В качестве примера рассмотрим зависимость распределения действующего значения несинусоидального напряжения при двустороннем питании участка тяговой сети от пространственной координаты x при различном положении электровоза, движущегося вдоль участка. На рис. 6 представлены графики этих зависимостей, соответствующие положению электровоза, причем минимальное значение напряжения на каждом графике соответствует координате, в которой находится электровоз. Например, минимальное значение напряжения для желтого графика соответствует $x = 5$ км, что означает нахождение электровоза в точке, удаленной от начала линии на 5 км. Анализ приведенных зависимостей дает возможность оценить минимальный уро-

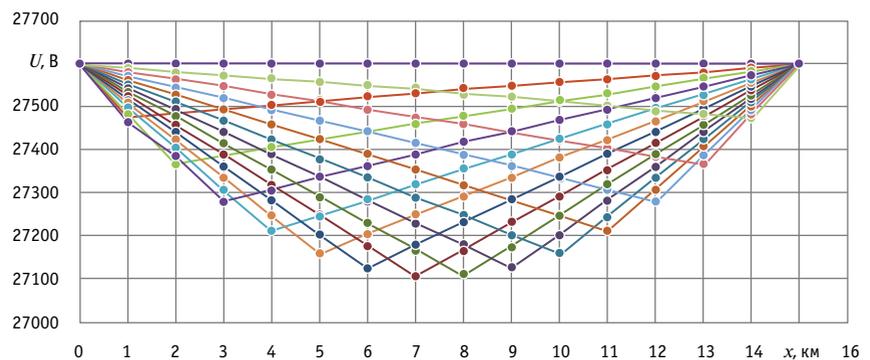


Рис. 6. Распределение действующего значения напряжения вдоль участка тяговой сети в зависимости от положения электровоза

вень действующего значения напряжения на токоприемнике электровоза при различном его местоположении на участке тяговой сети (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от известных исследований, в настоящей работе предложен комплексный подход к анализу волновых процессов в тяговой сети переменного тока.

Созданная в среде SimInTech имитационная модель позволяет рассмотреть волновые процессы при совместной работе питающей системы и тяговой сети. Разработка модели системы электрооборудования железных дорог переменного тока дает возможность оценить влияние волновых процессов, в том числе резонансных явлений, на безопасность

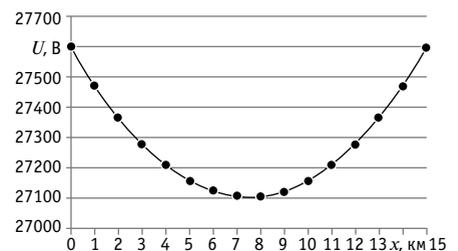


Рис. 7. Зависимость минимального действующего значения напряжения на токоприемнике электровоза от координаты его нахождения на участке тяговой сети

и надежность работы смежных устройств. Адекватность предложенной модели, созданной в SimInTech, проверена сравнительным анализом результатов моделирования и расчета в MathCAD.

Литература

1. Каштанов А. Л., Комяков А. А., Никифоров М. М. О работе по актуализации энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем : материалы второй международной научно-практической конференции / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 159–165.
2. Cheremisin V. T., Komyakov A. A., Erbes V. V. Simulation of power consumption in railway power supply systems with of artificial intelligence aids // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, May 16–19, 2017. St. Petersburg, 2017. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076242.
3. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Черепанов А. В. Моделирование резонансных процессов на высших гармониках в тяговых сетях переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3. С. 214–221. ISSN 1813–9108.

References

1. Kashtanov A. L., Komyakov A. A., Nikiforov M. M. On work aimed at actualization of the energy strategy for «Russian Railways» holding for the period up to 2020 and for the perspective up to 2030 [O rabote po aktualizatsii energeticheskoy strategii kholdinga «Rossiyskie zheleznyye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda] // Increase of energy efficiency of ground transportation systems : proceedings of the 2nd International scientific and practical conference / OSTU. Omsk, 2016. Pp. 159–165.
2. Cheremisin V. T., Komyakov A. A., Erbes V. V. Simulation of power consumption in railway power supply systems with of artificial intelligence aids // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, May 16–19, 2017. St. Petersburg, 2017. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076242.
3. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Cherepanov A. V. Modelling of highest harmonics resonant processes in alternating current traction nets [Modelirovanie rezonansnykh protsessov na vysshikh garmonikakh v tyagovykh setyakh peremennogo toka] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016. No. 3. Pp. 214–221. ISSN 1813–9108.

4. Савоскин А. Н., Кулинич Ю. М., Алексеев А. С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть — электровоз» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35. ISSN 0013–5380.
5. Ковалева Т. В., Пашкова Н. В. Исследование волновых процессов в контактной сети и линиях электропередачи // Известия Транссиба. 2015. № 2 (22). С. 71–79. ISSN 2220–4245.
6. Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Зависимость волновых процессов в тяговой сети переменного тока от параметров системы электроснабжения // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 23–27. ISSN 1813–8225.
7. Сташков И. А. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства для повышения качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Красноярск, 2016. 21 с.
8. Довгун В. П., Сташков И. А. Компенсация резонансных перенапряжений на токоприемнике ЭПС в системе тягового электроснабжения переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 1 (45). С. 134–138. ISSN 1813–9108.
9. Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Влияние волновых процессов на работу объектов электроэнергетической инфраструктуры железнодорожного транспорта // Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития : материалы Четвертой международной научно-практической конференции / РГУПС. Ростов-на-Дону, 2020. С. 130–134.
10. Кучумов В. А., Ермоленко Д. В. Показатели качества электроэнергии на токоприемнике и взаимодействие ЭПС с системой тягового электроснабжения переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 1997. № 2. С. 11–16. ISSN 2223–9731.
11. Минина А. А., Пантелеев В. И., Платонова Е. В. Обеспечение качества электроэнергии в системах тягового электроснабжения переменного тока // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 3. С. 319–326. ISSN 1999–494X.
12. Сиромаха С. С., Осипов Д. С., Черемисин В. Т. О необходимости учета режима работы и импеданса системы электроснабжения при моделировании резонанса токов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. ISSN 2070–7428.
13. Бялонь А., Адамски Д., Фурман Ю. Влияние резонансов в контактной сети на допускаемые параметры помех // Электрифікація транспорту. 2016. № 11. С. 116–121. ISSN 2307–4221.
14. Зажирко В. Н. Некоторые резонансные свойства однородной двухпроводной линии в несинусоидальном периодическом режиме // Улучшение качества и снижение потерь электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог : межвузовский тематический сборник научных трудов / Омская государственная академия путей сообщения. Омск, 1995. С. 35–40.
15. Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Резонансные явления в тяговой сети переменного тока // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 32–35. ISSN 1813–8225.
16. Орлов А. И. Двухвыборочный критерий Вилкоксона — анализ двух мифов // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 104. ISSN 1990–4665.
4. Savoskin A. N., Kulnich Yu. M., Alexeev A. S. Mathematical modeling of electric and magnetic processes in «catenary — electric locomotive» dynamic system [Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoy sisteme «kontaktnaya set' — elektrovoz» // Electricity. 2002. No. 2. Pp. 29–35. ISSN 0013–5380.
5. Kovaleva T. V., Pashkova N. V. The wave processes study in the overhead system and power lines [Issledovanie volnovykh protsessov v kontaktnoy seti i liniyakh elektropredachi] // Journal of Transsib Railway Studies. 2015. No. 2 (22). Pp. 71–79. ISSN 2220–4245.
6. Kovaleva T. V., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Wave processes in alternating current traction network depending on parameters of power supply system [Zavisimost' volnovykh protsessov v tyagovoy seti peremennogo toka ot parametrov sistemy elektrosnabzheniya] // Omsk Scientific Bulletin. 2019. No. 3 (165). Pp. 23–27. ISSN 1813–8225.
7. Stashkov I. A. Multifunctional filter compensating devices for increase of energy quality in power systems with traction load [Mnogofunktsional'nye fil'trokompensiruyushhie ustroystva dlya povysheniya kachestva elektroenergii v elektroenergeticheskikh sistemakh s tyagovoy nagruzkoy] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Krasnoyarsk, 2016. 21 p.
8. Dovgun V. P., Stashkov I. A. Compensation of resonance overvoltage on a susceptor electric rolling in AC traction system [Kompensatsiya rezonansnykh perenapryazheniy na tokopriemnike EPS v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 1 (45). Pp. 134–138. ISSN 1813–9108.
9. Kovaleva T. V., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Influence of wave processes on operation of power infrastructure of railway transport [Vliyaniye volnovykh protsessov na rabotu ob'ektov elektroenergeticheskoy infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta] // Transport and logistics: spatial and technological synergy of development : proceedings of the 4th International scientific and practical conference / RSTU. Rostov-on-Don, 2020. Pp. 130–134.
10. Kuchumov V. A., Ermolenko D. V. Indicators of energy quality on a current collector and interaction of electrical motive power with alternating current traction power supply system [Pokazateli kachestva elektroenergii na tokopriemnike i vzaimodeystvie EPS s sistemoy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka] // VNIIZhT Scientific Journal. 1997. No. 2. Pp. 11–16. ISSN 2223–9731.
11. Minina A. A., Pantelev V. I., Platonova E. V. Ensuring quality of the electric power in systems of traction power supply of the alternating current [Obespecheniye kachestva elektroenergii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka] // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2012. Vol. 5. No. 3. Pp. 319–326. ISSN 1999–494X.
12. Siromakha S. S., Osipov D. S., Cheremisin V. T. About need of the accounting of the operating mode and impedance of system of power supply when modelling the resonance of currents [O neobkhodimosti ucheta rezhima raboty i impedansa sistemy elektrosnabzheniya pri modelirovaniy rezonansa tokov] // Modern Problems of Science and Education. 2014. No. 5. ISSN 2070–7428.
13. Byalon' A., Adamski D., Furman Yu. The influence of resonances in the contact network on the allowable interference parameters [Vliyaniye rezonansov v kontaktnoy seti na dopuskaemye parametry pomekh] // Electrification of transport. 2016. No. 11. Pp. 116–121. ISSN 2307–4221.
14. Zazhirkov V. N. Some resonance properties of homogeneous two-wire line in non-sinusoidal periodic mode [Nekotorye rezonansnye svoystva odnorodnoy dvukhpровodnoy linii v nesinusoidal'nom periodicheskom rezhime] // Increase of quality and decrease of energy losses in railway power supply systems : interuniversity subject collection of scientific papers / OSTU. Omsk, 1995. Pp. 35–40.
15. Kovaleva T. V., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Resonance in alternating current traction network [Rezonansnye yavleniya v tyagovoy seti peremennogo toka] // Omsk Scientific Bulletin. 2020. No. 4 (172). Pp. 32–35. ISSN 1813–8225.
16. Orlov A. I. Two-sample Wilcoxon test — analysis of two myths [Dvukhvyborochnyy kriteriy Vilkoksona — analiz dvukh mifov] // Scientific Journal of KubSAU. 2014. No. 104. ISSN 1990–4665.

Объем статьи 0,77 авторских листа

УДК 629.423.1

Алексей Владимирович Ларченко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Забайкальского института железнодорожного транспорта — филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС), Чита, Россия,

Виталий Геннадьевич Литвинцев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта — филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС), Чита, Россия,

Сергей Здиславович Овсейчик, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Забайкальского института железнодорожного транспорта — филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС), Чита, Россия

ПУСК ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ — УНИВЕРСАЛЬНОЕ ТЕСТОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Alexey Vladimirovich Larchenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Rolling Stock Department, Zabaikalsky Institute of Railway Transport — the branch of Irkutsk State Transport University (ZabIRT ISTU), Chita, Russia,
Vitaliy Gennadyevich Litvintsev, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply Department, Zabaikalsky Institute of Railway Transport — the branch of Irkutsk State Transport University (ZabIRT ISTU), Chita, Russia,
Sergey Zdislavovich Ovseychik, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Rolling Stock Department, Zabaikalsky Institute of Railway Transport — the branch of Irkutsk State Transport University (ZabIRT ISTU), Chita, Russia

Starting of electric traction motor — general-purpose testing action

Аннотация

На основе анализа развития средств и методов технического диагностирования двигателей постоянного тока предложено использовать переходный процесс пуска тягового электродвигателя на холостом ходу как универсальное тестовое воздействие для определения неисправностей электрических машин, в том числе причин плохой коммутации двигателей. Проведены эксперименты по пуску электродвигателей различных марок и получены осциллограммы напряжения исправных и неисправных электрических машин постоянного тока, описание которых подробно изложено в статье.

Ключевые слова: электрические машины, диагностика, пусковые характеристики, пульсации напряжения.

Summary

On the basis of analysis of means and methods for technical diagnostics the authors suggest to use a transient process of no-load starting of electric traction motors as a general-purpose testing action for determination of faults of electrical machines including reasons of bad commutation of motors. The authors have carried out experiments on starting of electric motors of various brands. As a result, they have got oscillograms of voltage of faulty and non-faulty direct current electrical machines precisely described in the paper.

Keywords: electrical machines, diagnostics, torque-current characteristics, voltage ripple.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-86-92

Важнейшая задача, решение которой должно привести к повышению эксплуатационной надежности, а также снижению временных и материальных затрат на ремонт и испытание тяговых электродвигателей (ТЭД), — определение причин их плохой коммутации [1]. Исходя из анализа направлений развития средств и методов технического диагностирования двигателей постоянного тока [2–4] представляет интерес возможность использовать для этой цели переходный процесс пуска тягового электродвигателя, поскольку он может рассматриваться и как универсальное тестовое воздействие.

С учетом возможностей реализации диагностического теста в виде пуска электрической машины на холостом ходу применительно к условиям ремонта тяговых электрических машин в депо [5, 6] предлагается система тестового диагностирования, представленная на рис. 1.

Диагностический тест заключается в формировании воздействия X , вызывающего переходный процесс пуска электрической машины на холостом ходу, который характеризуется множеством нестационарных выходных функций $Z(t)$. Для упрощения терминологии указанное множество целесообразно именовать или как переходные функции, или как пусковые характеристики. Множество $Z(t)$ определяется путем регистрации его мгновенных значений в устройстве памяти измерительного комплекса с шагом квантования dt . Заключение о техническом состоянии электрической машины определяется по соотношению

$$\overline{Z(t)} - Z(t) \in Dg, \quad (1)$$

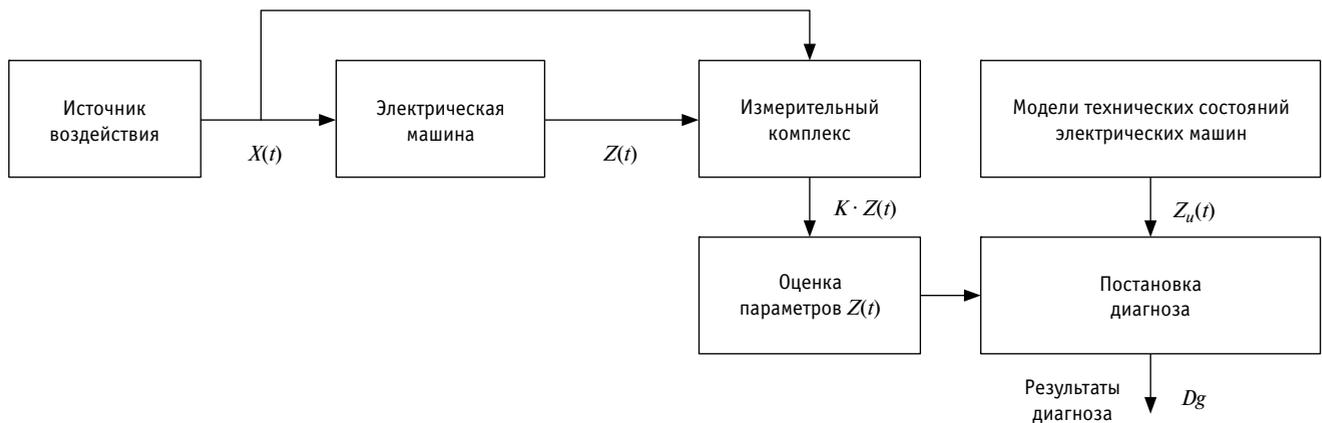


Рис. 1. Функциональная схема системы тестового диагностирования, реализующая оценку технического состояния электрической машины с использованием процесса пуска на холостом ходу

где $\overline{Z(t)}$ — эталон сравнения;
 Dg — критерии сравнения.

Эксперименты, проведенные в сервисном локомотивном депо Чита при ремонте тяговых электрических машин в соответствии с предложенным тестом, показали, что в качестве множества $Z(t)$ наиболее эффективно могут быть использованы графики изменения тока якоря $I(t)$, напряжения между разнополярными щеткодержателями $U(t)$, в дальнейшем именуемые как напряжение на щетках, и частоты вращения якоря $n(t)$. Цель экспериментов заключалась в определении расхождений множеств $Z(t)$ у исправных $Z_{и}(t)$ и неисправных $Z_{н}(t)$ электрических машин, т.е.

$$\Delta Z(t) = Z_{и}(t) - Z_{н}(t). \quad (2)$$

Поскольку нет возможности заранее выбрать для теста электрическую машину с характерной неисправностью, при исследовании выполнялась в том числе имитация неисправностей. В итоге при проведении диагностического теста была получена возможность анализировать расхождения (2) при нарушениях точности установки нейтрали, ослабленного нажатия на щетки или их недопустимого износа, при наличии неровностей коллектора, асимметрии магнитной цепи главных и дополнительных полюсов.

Установлено, что практически во всех случаях имело место неравенство

$$\Delta Z(t) = Z_{и}(t) - Z_{н}(t) \neq 0, \quad (3)$$

которое подтверждалось на осциллограммах даже без математической обработки. Характерный вид пусковых характеристик, полученных при диагностическом тесте, представлен на рис. 2.

Условно пусковые характеристики целесообразно разделить на две зоны. Первая зона — разгон электрической машины, вторая — переход к установившемуся режиму. Это вызвано и тем фактом, что на осциллограммах пусковых характеристик (см. рис. 2) пульсации в первой и второй зонах различаются, особенно у напряжения на щетках (рис. 3).

Поэтому процессы $I_a(t)$ и $U_{щ}(t)$ целесообразно представить в виде двух составляющих:

$$I_a(t) = I_{\infty}(t) + I_{\sim}(t);$$

$$U_{щ}(t) = U_{\infty}(t) + U_{\sim}(t). \quad (4)$$

Первые слагаемые $I_{\infty}(t)$ и $U_{\infty}(t)$ характеризуют переходные функции в электрической цепи (см. рис. 2) от источника напряжения к току якоря и к напряжению на щетках. Эти составляющие представляют собой аperiодические процессы, которые характеризуются суммой или произведением экспоненциальных функций, длительность которых составляет от нескольких секунд до десятков секунд, и, как правило, это монотонные функции. Вторые составляющие $I_{\sim}(t)$ и $U_{\sim}(t)$, собственно пульсации, — высокочастотные (сотни или тысячи Гц), они определяются в основном особенностями самой электрической машины, поэтому и могут быть источником диагностической информации.

Как показал анализ, дефекты двигателя влияют на параметры пульсаций напряжения, а также на распределение индукции в воздушном зазоре [7]. Для подтверждения этого были проведены эксперименты по исследованию пульсаций напряжения на щетках электрических машин различного исполнения (МСП-0,25, ДМК-1) и тягового электродвигателя НБ-418К6. Эксперименты выполнены в соответствии с предложенным тестом.

Тестирование электродвигателей стрелочного перевода МСП-0,25 проведено при отсутствии и с имитацией неисправностей:

- исправное состояние;
- недостаточное давление нажатия на щетку;
- замкнутые коллекторные пластины;
- недостаточное нажатие на щетку и замкнутые коллекторные пластины.

Пусковые характеристики, вид которых представлен на рис. 4, обработаны с помощью фильтра, отсекающего постоянную составляющую (рис. 5).

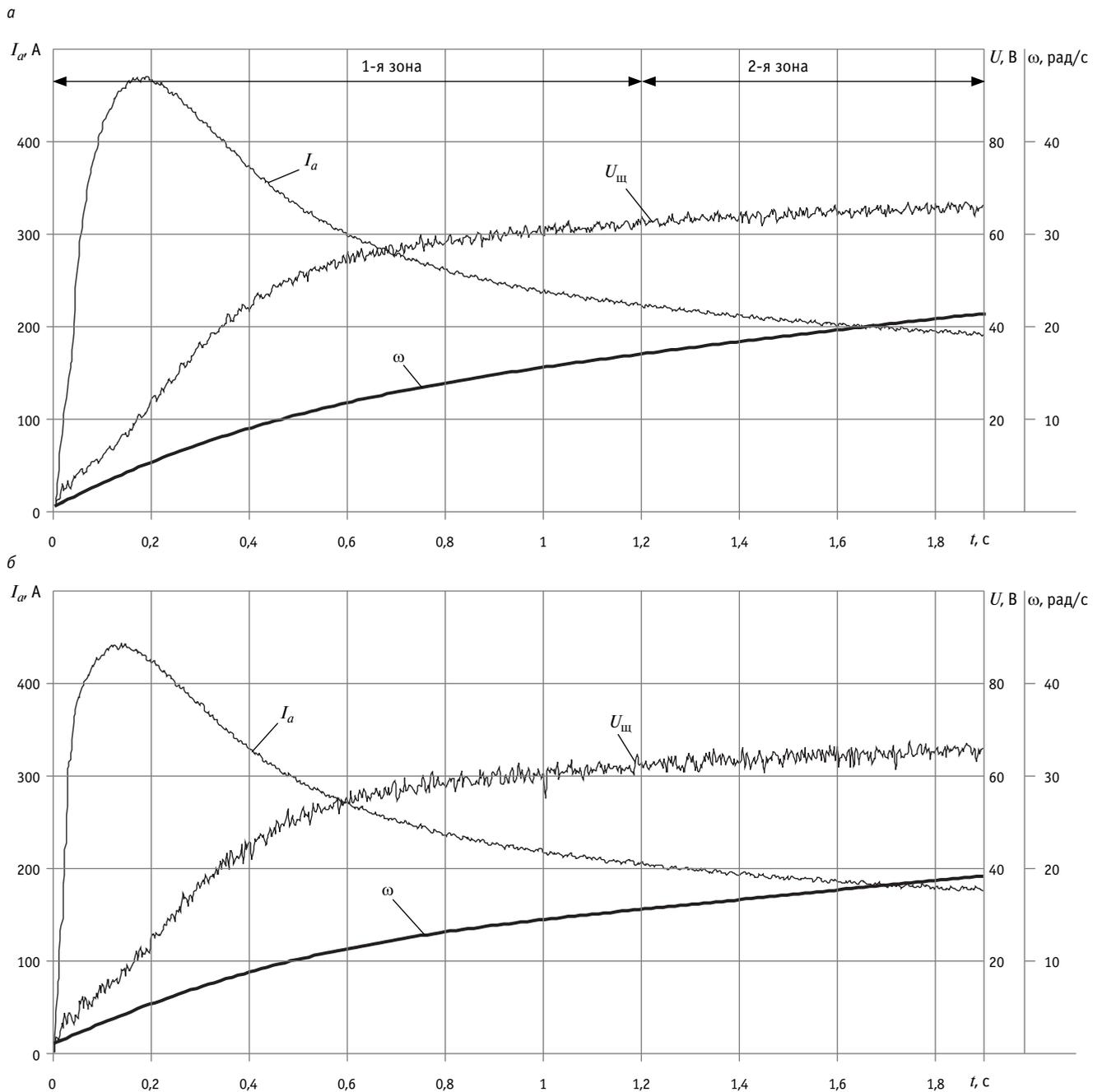


Рис. 2. Вид пусковых диаграмм, полученных при реализации диагностического теста для исправной (а) и неисправной (б) электрической машины:

I_a — ток якоря; $U_{щ}$ — напряжение, снятое между щеток различной полярности; ω — угловая скорость вращения

При детальном изучении графиков рис. 5 видно, что период между пульсациями в исправном двигателе Т1 больше, чем у двигателя с неисправностями Т2, кроме того, пульсации в двигателе с ослабленным нажатием на щетки становятся «двойными» (стрелки В на меньших частотах вращения). У двигателя с замкнутыми коллекторными пластинами амплитуда пульсаций больше, чем у исправного. У двигателя с недостаточным нажатием на щетку и замкнутыми кол-

лекторными пластинами частота пульсаций выше и первые пульсации появляются «раньше», чем у двигателя без неисправностей (стрелки Б).

Таким образом, можно утверждать, что пульсации напряжения на щетках при пуске указанного электродвигателя обладают диагностической информацией и даже без достаточного математического анализа дают некоторое представление о состоянии электрической машины.

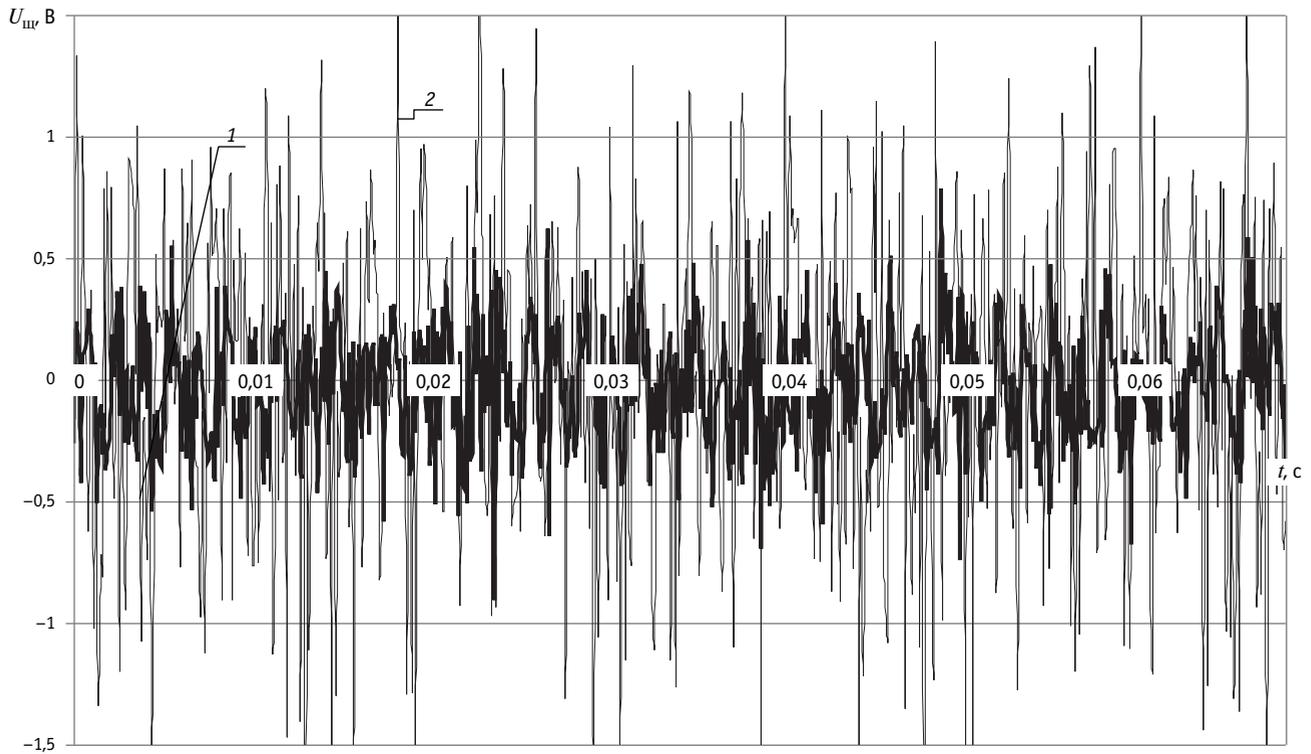


Рис. 3. Пример осциллограмм пульсаций напряжения на щетках исправного (1) и неисправного (2) тягового электродвигателя НБ-418К6 (зона 2)

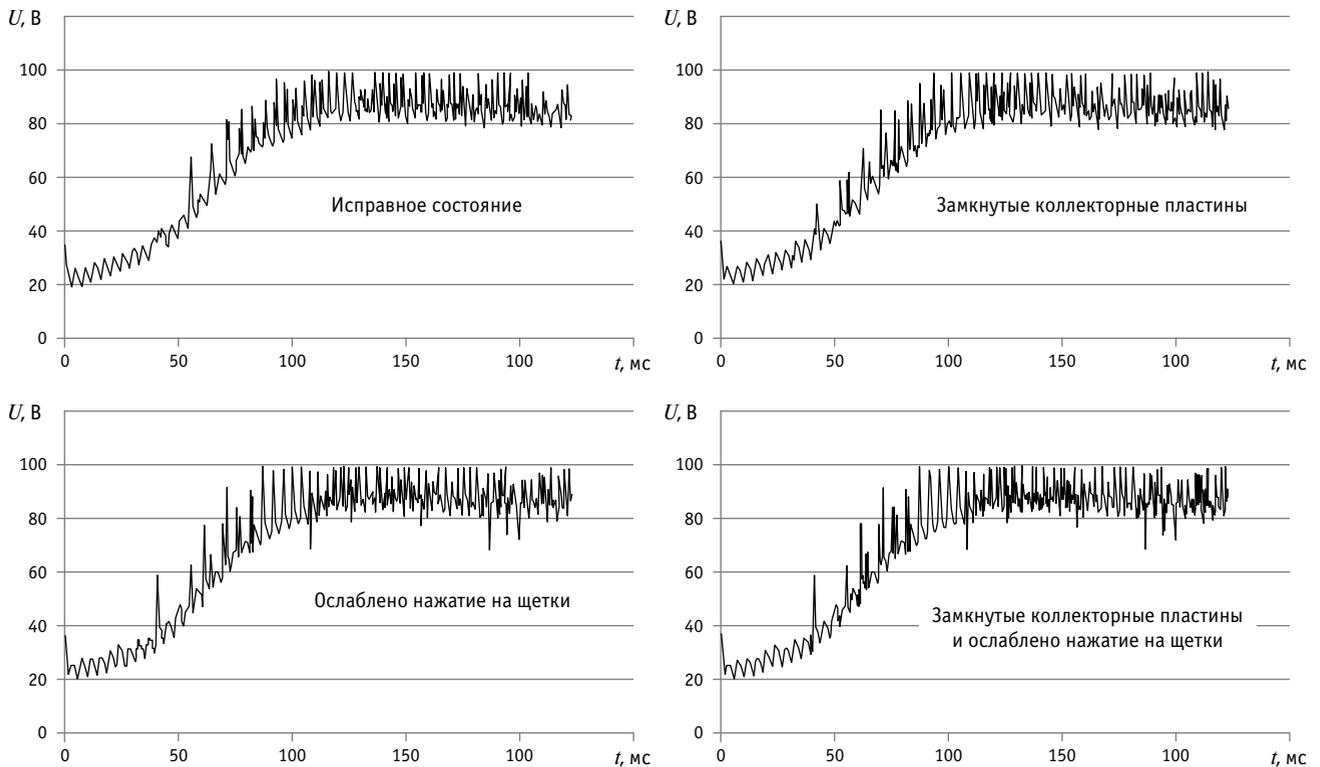


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на щетках электродвигателя МСП-0,25

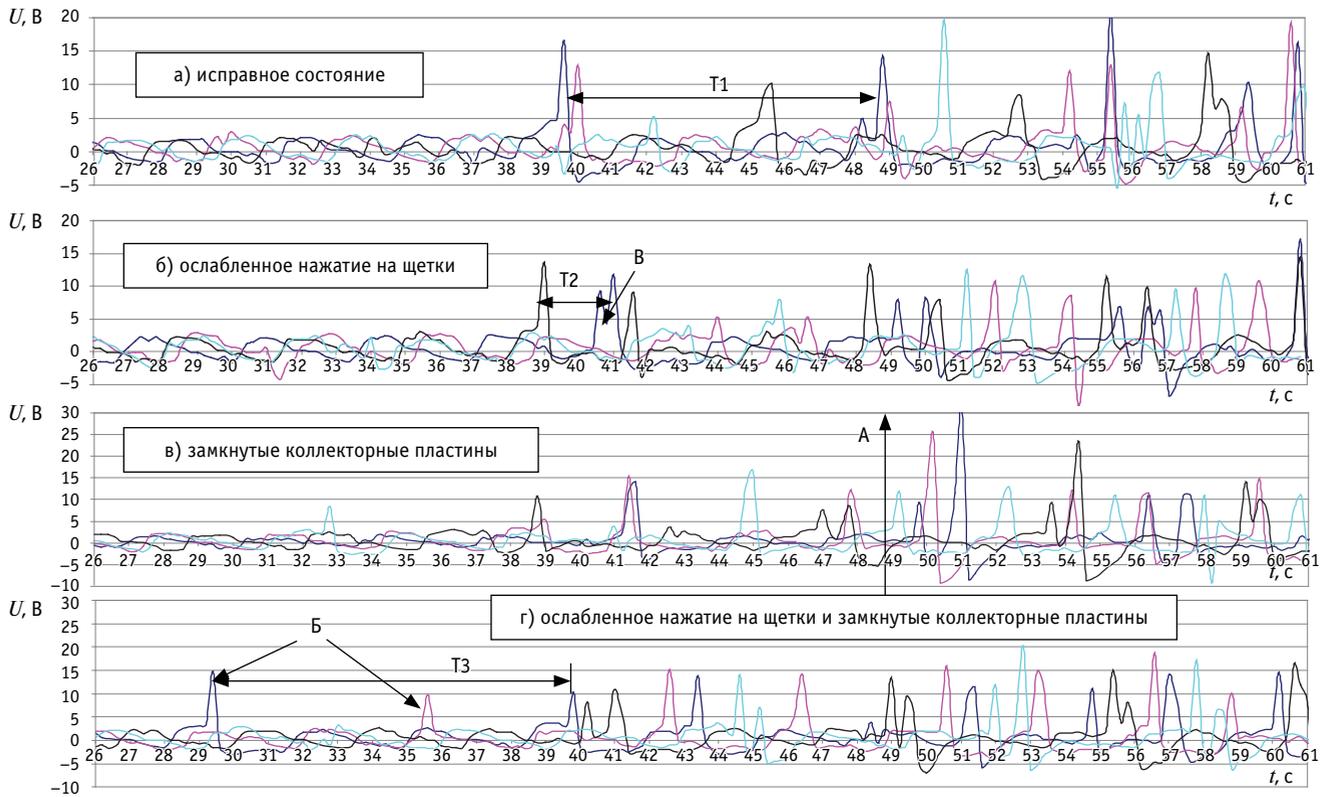


Рис. 5. Осциллограммы пульсаций напряжения на коллекторе, полученные при пуске двигателя от стрелочного перевода

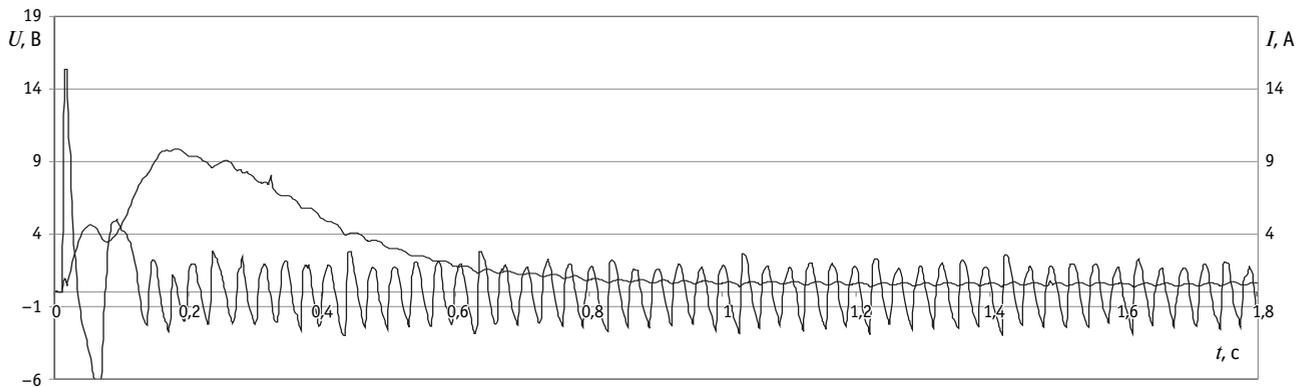


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на щетках и тока якоря исправного двигателя ДМК-1, полученные при его пуске

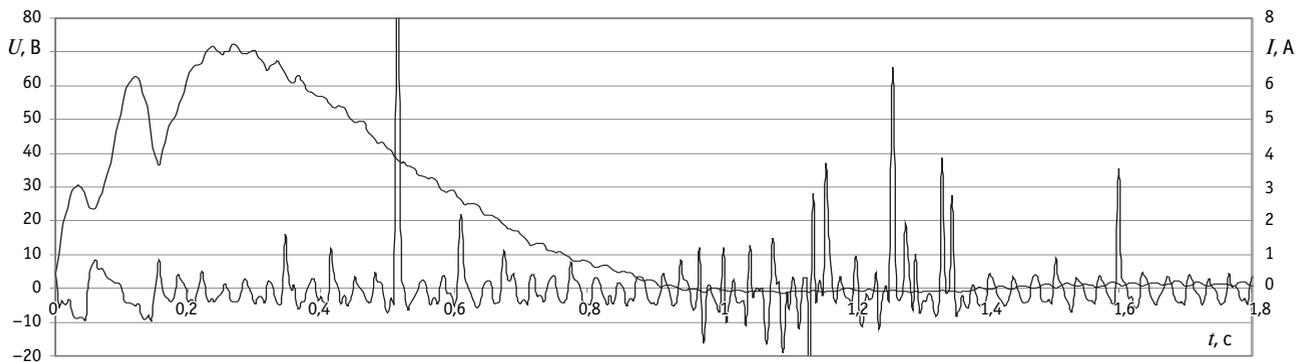


Рис. 7. Осциллограммы напряжения на щетках и тока якоря двигателя ДМК-1 со сдвигом щеток с нейтрали, полученные при его пуске

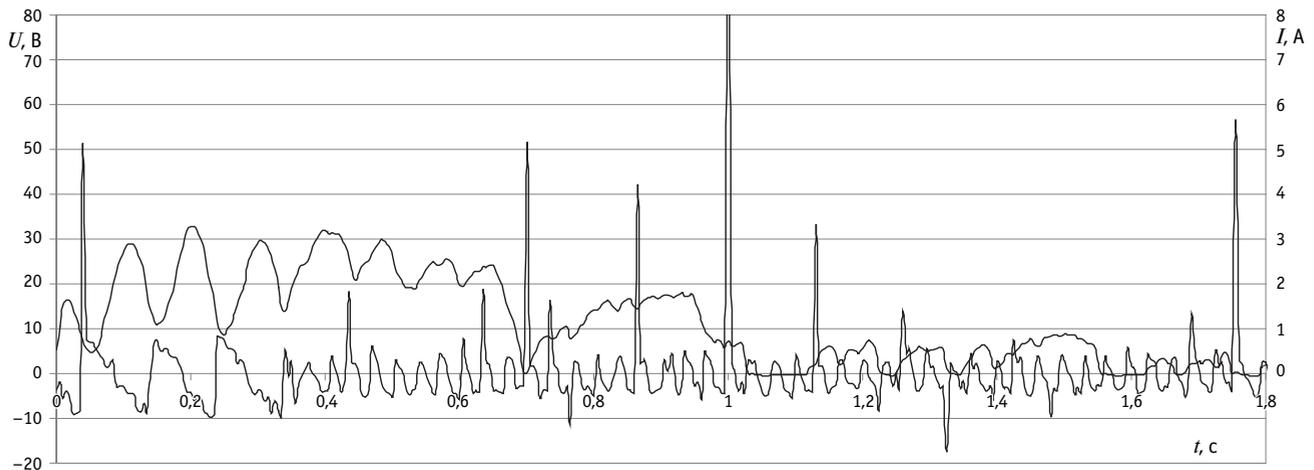


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на щетках и тока двигателя ДМК-1 со сдвигом щеток с нейтрали и ослабленным нажатием щеток

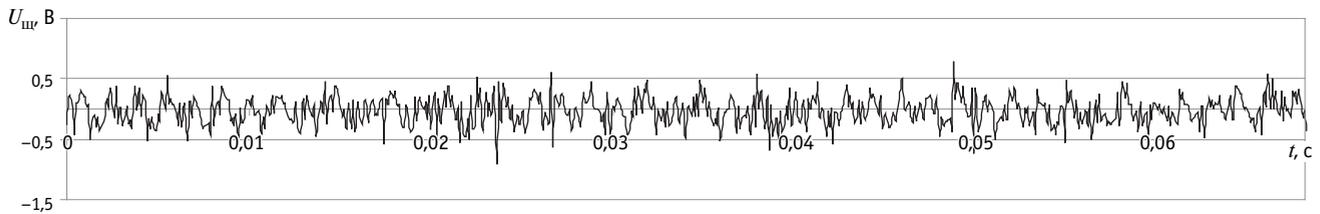


Рис. 9. Осциллограмма пульсаций напряжения на щетках исправного ТЭД НБ-418К6

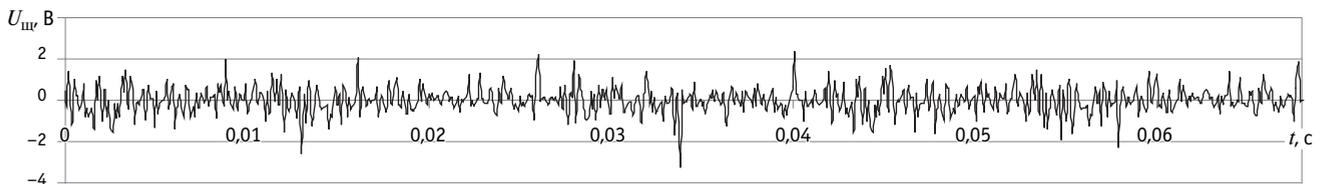


Рис. 10. Осциллограмма переменной составляющей напряжения на щетках неисправного ТЭД НБ-418К6 (сдвиг щеток с нейтрали на 9 мм)

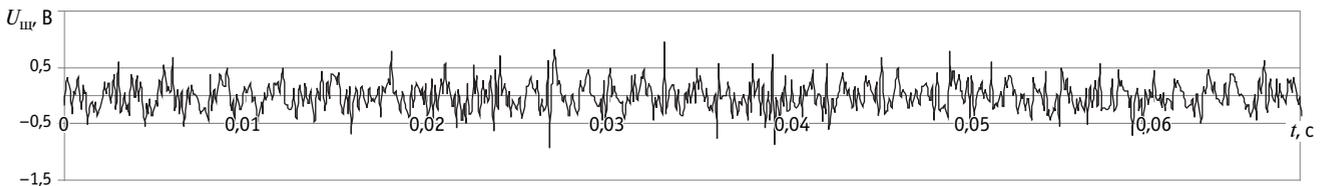


Рис. 11. Осциллограмма переменной составляющей напряжения на щетках неисправного ТЭД НБ-418К6 (одиночная неровность коллектора)

На двигателях ДМК-1 также была проведена серия экспериментов по пуску с записью осциллограмм тока якоря и напряжения на щетках. При этом, как и на двигателях МСП-0,25, выполнялась имитация неисправностей, что и отражалось на пусковых диаграммах (рис. 6–8).

На тяговом электродвигателе НБ-418К6 (см. рис. 2) пульсации тока якоря существенно меньше, чем на электрических машинах МСП-0,25 и ДМК-1, что вызвано значительно большей индуктивностью обмотки якоря. Однако пульсации напряжения, как и у машин малой мощности, реагируют на наличие неисправностей (рис. 9–11).

Отметим, что представленный анализ не является достаточным для принятия решения о наличии неисправностей. Однако множество параметров, характеризующих процесс пульсаций, можно определять на основании статистического анализа, считая его необходимым, но недостаточным, поскольку процесс пульсаций — не стационарный эргодический процесс. Тем не менее, данные статистического анализа можно охарактеризовать в виде избыточной информации результатов диагностического теста, что служит одним из необходимых условий диагностирования технических объектов, поэтому результаты такого анализа представляют практический интерес.

Литература

1. Авиллов В. Д., Петров И. Г., Моисеенко Е. М. К вопросу о повышении коммутационной устойчивости коллекторных машин постоянного тока // Известия Транссиба. 2010. № 2 (2). С. 2–7. ISSN 2220–4245.
2. Глущенко М. Д. Диагностические комплексы электроподвижного состава. Москва : МИИТ, 2004. 96 с.
3. Завидей В. И. Новые возможности в диагностике электрических машин // Экспозиция Нефть Газ. 2010. № 2. С. 33–35. ISSN 2076–6785.
4. Акименко В. В. Виды отказов электрических двигателей, их признаки, причины и методы устранения // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 6. Горный инженер-3. Промышленная безопасность и охрана труда. Москва : Горная книга, 2012. С. 58–67.
5. Система тестового диагностирования, реализующая оценку технического состояния электрической машины с использованием процесса пуска на холостом ходу / М. Д. Глущенко, А. В. Ларченко, А. Д. Чуйко, С. А. Христенков // Электроника и электрооборудование транспорта. 2015. № 2. С. 38–41. ISSN 1812–6782.
6. Ларченко А. В. Методика и контрольно-измерительный комплекс для определения дефектов тяговых электродвигателей НБ-418К6 // Транспорт Урала. 2008. № 3 (18). С. 69–72. ISSN 1815–8400.
7. Ларченко А. В. Влияние неисправностей тяговых электродвигателей электровазозов на распределение магнитной индукции в воздушном зазоре // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 9 (243). С. 8–11. ISSN 2072–8115.

Объем статьи 0,83 авторских листа

References

1. Avilov V. D., Petrov I. G., Moiseenko E. M. Increasing of switching stability on DC machines [K voprosu o povyshenii kommutatsionnoy ustoychivosti kollektornykh mashin postoyannogo toka] // Journal of Transsib Railway Studies. 2010. No. 2 (2). Pp. 2–7. ISSN 2220–4245.
2. Glushhenko M. D. Diagnostic complexes for electric motive power [Diagnosticheskie komplekсы elektropodvizhnogo sostava]. Moscow : MIIT, 2004. 96 p.
3. Zaviday V. I. New possibilities in diagnostics of electrical machines [Novye vozmozhnosti v diagnostike elektricheskikh mashin] // Exposition Oil & Gas. 2010. No. 2. Pp. 33–35. ISSN 2076–6785.
4. Akimenko V. V. Types of faults of electric motors, their attributes, reasons and methods of elimination [Vidy otkazov elektricheskikh dvigateley, ikh priznaki, prichiny i metody ustraneniya] // Mining informashional and analytical bulletin. Fascicle No. 6. Mining engineer-3. Industrial security and labour protection. Moscow : Mining book, 2012. Pp. 58–67.
5. System of test diagnostics that provides assessment of technical condition of electrical machines with the use of no-load starting [Sistema testovogo diagnostirovaniya, realizuyushhaya otsenku tekhnicheskogo sostoyaniya elektricheskoy mashiny s ispol'zovaniem protsessa puska na kholostom khodu] / M. D. Glushhenko, A. V. Larchenko, A. D. Chuyko, S. A. Khristosenkov // Electronics and electrical equipment of transport. 2015. No. 2. Pp. 38–41. ISSN 1812–6782.
6. Larchenko A. V. Method and control-and-measure complex for determination of faults of NB-418K6 electric traction motors [Metodika i kontrol'no-izmeritel'nyy kompleks dlya opredeleniya defektov tyagovykh elektrodvigateley NB-418K6] // Transport of the Urals. 2008. No. 3 (18). Pp. 69–72. ISSN 1815–8400.
7. Larchenko A. V. Influence of faults of electric traction motors for electric locomotives on distribution of magnetic induction in air gaps [Vliyanie neispravnostey tyagovykh elektrodvigateley elektrovovozov na raspredelenie magnitnoy induktsii v vozduzhnom zazore] // Bulletin of Transport Information. 2015. No. 9 (243). Pp. 8–11. ISSN 2072–8115.

УДК 621.315

Виталий Геннадьевич Литвинцев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта — филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (ЗабИЖТ ИргУПС), Чита, Россия,

Алексей Владимирович Ларченко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Забайкальского института железнодорожного транспорта — филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (ЗабИЖТ ИргУПС), Чита, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Vitaliy Gennadyevich Litvintsev, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply Department, Zabaikalsky Institute of Railway Transport — the branch of Irkutsk State Transport University (ZabIRT ISTU), Chita, Russia,
Alexey Vladimirovich Larchenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Rolling Stock Department, Zabaikalsky Institute of Railway Transport — the branch of Irkutsk State Transport University (ZabIRT ISTU), Chita, Russia

Study of complex influence of operating indicators on energy losses in catenary

Аннотация

На основе исследования, проведенного с использованием математического аппарата корреляционного анализа, из множества эксплуатационных показателей работы электрифицированного участка железной дороги, влияющих на потери электроэнергии в тяговой сети, выбраны два параметра — грузооборот и средняя участковая скорость. Показана возможность выбирать в оперативной обстановке оптимальную с точки зрения минимизации потерь электрической энергии схему соединения контактной подвески на основе выборки рассматриваемых факторов с определенной доверительной вероятностью.

Ключевые слова: эксплуатационный показатель, потери электроэнергии, тяговая сеть, схема питания, корреляционный анализ.

Summary

With the use of mathematical technique of correlation analysis the authors have selected two parameters — turnover of goods and average service speed, among many operating indicators of an electrified railway section that affect energy losses in traction power system. In operative environment the authors suggest to use a catenary suspension mounting scheme that is optimal in terms of minimization of energy losses in traction power system on the basis of a sample of the considered factors with a determined confidence level.

Keywords: operating indicator, energy losses, traction power system, feed circuit, correlation analysis.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-93-96

На современном этапе расширения полигона электрифицированных железных дорог, развития и модернизации системы тягового электроснабжения огромное внимание уделяется экономии потребления электрической энергии (ЭЭ) за счет снижения ее удельного расхода на тягу поездов, обусловленного потерями ЭЭ в контактной сети.

Тяговая система электроснабжения характеризуется рядом показателей, основные из которых — токи нагрузки, потери напряжения в элементах системы, пропускная способность участков межподстанционных зон и др. Все эти параметры в разной степени зависят от схем питания контактной сети. Правильность выбора способа питания контактной сети электрифицированных двухпутных железнодорожных участков оказывает влияние на надежность и экономичность ее работы. При этом надежность может достигаться за счет автоматизации сборки схемы питания и секционирования контактной сети в зависимости от основных эксплуатационных параметров движения на конкретном участке.

Сокращение потерь электрической энергии на тягу поездов и равномерная загрузка контактной сети отдельных участков и путей влияют на экономическую составляющую эффективности работы схем питания. Величина снижения этих потерь зависит от многих факторов, таких как соотношение расходов энергии поездов на первом и втором путях (особенно при применении рекуперации), степень использования пропускной способности, разнотипность поездов, характер изменения тока поезда, число поперечных соединений, их расположение, соотношения сопротивлений проводов контактной сети на обоих путях [1–3].

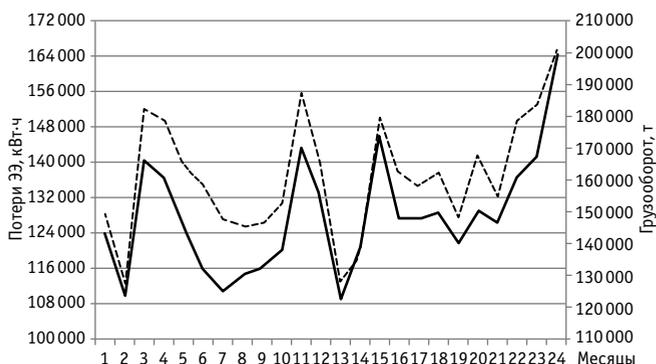


Рис. 1. Суммарные значения потерь электрической энергии и грузооборота:
 — — потери ЭЭ; - - - - грузооборот

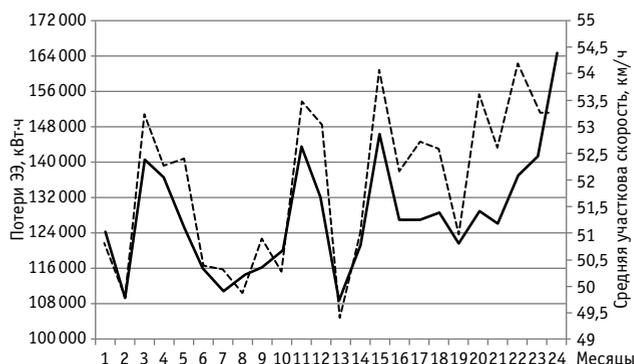


Рис. 2. Суммарные значения потерь электрической энергии и средней участковой скорости:
 — — потери ЭЭ; - - - - средняя участковая скорость

Анализ многочисленных статистических данных позволяет сделать вывод, что величина потерь в устройствах тягового электроснабжения находится в пределах 8–10 % от общего расхода электрической энергии, отпускаемой на тягу поездов. Следовательно, этот показатель необходимо учитывать при определении, планировании и корректировке норм удельного расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД» [4].

Поскольку контактная подвеска двухпутных участков электрически связана, ее сечение увеличивается, что приводит к снижению потерь электрической энергии. Потери электроэнергии в контактной сети — одна из составляющих общего расхода тягового электропотребления подстанцией, следовательно, они влияют на величину удельного расхода электрической энергии на тягу поездов, т.е. чем меньше потери, тем меньше удельный расход.

Одним из вариантов решения поставленной задачи является выбор рациональной схемы питания тяговой сети двухпутных участков по условию минимальных потерь электрической энергии при заданных эксплуатационных показателях. Исследование сочетания вариаций основных показателей движения поездов также позволит добиться некоторого уменьшения удельного расхода тягового электропотребления за счет снижения потерь в контактной сети.

На начальном этапе была поставлена задача по проведению статистических исследований влияния различных эксплуатационных факторов на потери электрической энергии в тяговой сети. В качестве полигона выбран электрифицированный участок Забайкальской железной дороги с узловой схемой питания тяговой сети. На диаграммах (рис. 1 и 2) представлена статистическая информация в виде зависимости грузооборота (P) и средней участковой скорости ($v_{уч}$) на потери ЭЭ (ΔW). Для исследования использовались значения рассматриваемых показателей за каждый месяц в течение двух лет.

Как показали результаты исследования, при увеличении скорости движения поездов массой 3000 т на 5 км/ч потери энергии при узловой схеме питания контактной сети снижаются в среднем на 1,65 тыс. кВт·ч. Следует отметить, что с увеличением скорости потребления электрической энергии из контактной сети снижается по причине меньшего количества раз-

гонов и остановок. Кроме того, повышение скорости приводит к сокращению времени хода подвижного состава по перегону, а значит, и длительности хода под током.

Анализ диаграмм, представленных на рис. 1 и 2, позволил сделать вывод о тесном взаимном воздействии рассматриваемых показателей на потери ЭЭ. Для определения взаимного влияния эксплуатационных показателей друг на друга и на зависимую переменную в отдельности выполнено исследование, алгоритм которого приведен ниже [5, 6].

1. Определение тесноты связи между эксплуатационными показателями и потерями ЭЭ при помощи коэффициента корреляции:

$$r_{P\Delta W} = \frac{S_{P\Delta W}}{\sqrt{S_P^2} \cdot \sqrt{S_{\Delta W}^2}}; r_{v\Delta W} = \frac{S_{v\Delta W}}{\sqrt{S_v^2} \cdot \sqrt{S_{\Delta W}^2}}, \quad (1)$$

где $S_{P\Delta W} = \overline{P \cdot \Delta W} - \overline{P} \cdot \overline{\Delta W}$; $S_{v\Delta W} = \overline{v \cdot \Delta W} - \overline{v} \cdot \overline{\Delta W}$;

$$S_P^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P - \overline{P})^2}{n}; S_{\Delta W}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta W_i - \overline{\Delta W})^2}{n};$$

n — количество измерений ($n = 24$).

2. Определение средней ошибки аппроксимации функции регрессии, %:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta W_i - \Delta W)}{\Delta W_i}. \quad (2)$$

3. Проверка значимости между эксплуатационными показателями и объемом потерь ЭЭ на основе сравнения стандартной ошибки коэффициента парной корреляции $\sigma_{r_{P\Delta W}}$, $\sigma_{r_{v\Delta W}}$ и самих коэффициентов $r_{P\Delta W}$, $r_{v\Delta W}$. При этом необходимо, чтобы было выполнено условие

$$\sigma_{r_{P\Delta W}} < r_{P\Delta W}; \sigma_{r_{v\Delta W}} < r_{v\Delta W}. \quad (3)$$

Кроме того, выполняется проверка уровня значимости на основе сопоставления коэффициента парной корреляции с $\sigma_{r_{P\Delta W}}$ и $\sigma_{r_{v\Delta W}}$ при этом необходимо получить



$$t_{расч} = r_{P\Delta W} \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{P\Delta W}^2}}; t_{расч} = r_{v\Delta W} \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{v\Delta W}^2}}, \quad (4)$$

где $t_{расч}$ — расчетное значение t -критерия.

Важный критерий — соблюдение условия $t_{расч} > t_{табл}$ для заданного уровня вероятности α и $(n - 2)$ степеней свободы как параметр целесообразности доверия полученной оценки коэффициента парной корреляции. Сравнительный анализ показал высокую значимость исследуемых факторов для всех рассмотренных случаев — на уровне $\alpha = 0,05$.

4. Определение F -критерия Фишера для идентификации правильного подбора типа взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами. Необходимым условием в данном случае является $F_{расч} > F_{теор}$:

$$F_{расч} = \frac{r_p^2(n-m)}{(1-r_p^2) \cdot (m-1)}; F_{расч} = \frac{r_v^2(n-m)}{(1-r_v^2) \cdot (m-1)}, \quad (5)$$

где m — число параметров уравнения регрессии ($m = 2$).

5. Оценка качества приближения регрессионной модели к наблюдаемым значениям ΔW при помощи коэффициента детерминации r^2 :

$$r^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta W_i - \overline{\Delta W})^2}{S_{\Delta W}^2}. \quad (6)$$

6. Определение среднего показателя эластичности каждого фактора для характеристики силы связи исследуемых показателей, а также для оценки построенной модели:

$$\bar{\Theta}_{P\Delta W} = \beta_1 \frac{\bar{P}}{\Delta W}; \bar{\Theta}_{v\Delta W} = \beta_2 \frac{\bar{v}}{\Delta W}. \quad (7)$$

Этот показатель указывает на величину изменения ΔW в процентном соотношении при увеличении (изменении) на 1 %

каждого эксплуатационного параметра, влияющего на потери электроэнергии на рассматриваемом участке.

С учетом выбранных показателей определено уравнение множественной регрессии вида

$$\Delta W = \beta_0 + \beta_1 \cdot \sum P + \beta_2 \cdot v + \varepsilon, \quad (8)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ — коэффициенты уравнения множественной регрессии.

В уравнении (8) коэффициент β_0 и ошибка ε включают в себя непредвиденные погрешности и неучтенные показатели работы участка железной дороги, такие как климатические факторы, аэродинамическое сопротивление движению, нагрев контактной сети, атмосферное воздействие и др.

Итак, определены все необходимые параметры уравнения множественной регрессии с элементами вычисления за каждый месяц. На основе собранных статистических данных составлены матрицы значений ΔW и показателей работы участка X :

$$\Delta W = \begin{pmatrix} \Delta w_1 \\ \Delta w_2 \\ \dots \\ \Delta w_{24} \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} 1 & P_1 & v_1 \\ 1 & P_2 & v_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & P_{24} & v_{24} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

После умножения обратной матрицы $(X' \cdot X)^{-1}$ на вектор $X' \cdot \Delta W$ получены коэффициенты уравнения множественной регрессии (1):

$$(X' \cdot X)^{-1} \cdot X' \cdot W_T = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

В табл. 1 приведены расчетные показатели статистического анализа и параметры уравнений комплексного влияния выбранных факторов на потери ЭЭ в тяговой сети для всех трех схем питания контактной подвески.

Таблица 1

Расчетные показатели статистического анализа

Показатель	Узловая схема	Раздельная схема	Параллельная схема
Уравнение комплексного влияния двух факторов на потери ЭЭ	$\Delta W = -40592,5 + 0,54P + 1552,9v$	$\Delta W = -65799,1 + 1,3P + 5440,7v$	$\Delta W = -66280,5 + 0,52P + 1896,4v$
Коэффициент простой линейной корреляции $r_{P\Delta W}$	0,93	0,82	0,87
Коэффициент простой линейной корреляции $r_{v\Delta W}$	0,84	0,77	0,79
Коэффициент множественной корреляции R	0,93	0,84	0,88
Средняя ошибка аппроксимации $A, \%$	2,68	4,51	4,44
Коэффициент детерминации r^2	0,87	0,71	0,77
Средний показатель эластичности $\Theta_{P\Delta W}$	0,69	0,64	0,73
Средний показатель эластичности $\Theta_{v\Delta W}$	0,63	0,86	0,82
$t_{расч} > t_{табл}$	Значимо	Значимо	Значимо
$F_{расч} > F_{теор}$	Значимо	Значимо	Значимо

Как следует из значений коэффициента множественной корреляции R (см. табл. 1), для всех схем питания контактной подвески характерна высокая значимость выбранных параметров. Также подтверждается высокий уровень их изменчивости при определении потерь ЭЭ в тяговой сети.

В уравнениях табл. 1 коэффициенты β_0 для трех схем питания контактной подвески, равные $-40592,5$; $-65799,1$; $-66280,5$, включают в себя неучтенные показатели и факторы, влияющие на потери электроэнергии. Следовательно, в связи с высокой значимостью двух показателей P и ν полученные уравнения комплексного влияния на параметр ΔW можно использовать для дальнейших исследований.

По результатам проведенного автокорреляционного анализа временного ряда на основе методики Дарбина — Уотсона и Бреуша — Годфри определено, что рациональным и до-

статочным объемом выборки исследуемых показателей работы участка железной дороги являются помесячные значения (всего 24) за два предыдущих года [7, 8].

Таким образом, можно утверждать, что из многочисленного спектра факторов, влияющих на тяговое электропотребление, а следовательно, и на потери электроэнергии в контактной сети, наиболее значимы грузооборот и средняя участковая скорость.

В заключение необходимо отметить, что полученные уравнения совокупного влияния грузооборота и средней участковой скорости движения на потери электроэнергии позволят в оперативной обстановке выбирать оптимальную схему соединения контактной подвески по условию минимизации потерь электроэнергии, что представляет практический интерес и является целью дальнейших исследований.

Литература

1. Феоктистов В. П., Бакланов А. А. Основы нормирования расхода электроэнергии для электропоездов // Энергетическое обследование структурных подразделений филиалов ОАО «РЖД»: материалы сетевой научно-практической конференции. Омск: ОмГУПС, 2004. С. 45–47.
2. Бакланов А. А. Пути снижения расхода электроэнергии на тягу поездов в эксплуатации // Ресурсосберегающие технологии на предприятиях Западно-Сибирской железной дороги: материалы научно-практической конференции. Омск: ОмГУПС, 2001. С. 87–95.
3. Сидорова Е. А. Система учета и анализа показателей эксплуатационной работы // Железнодорожный транспорт. 2005. № 11. С. 30–32. ISSN 0044–4448.
4. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Москва: ОАО «РЖД», 2016. 76 с.
5. Литвинцев В. Г., Раевский Н. В., Крюков А. В. Построение модели прогнозирования тягового электропотребления на основе интервальной регрессии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4 (28). С. 192–196. ISSN 1813–9108.
6. Маслов Г. П., Магай Г. С., Литвинцев В. Г. Влияние скорости движения поездов на удельный расход электрической энергии на участках электрической железной дороги переменного тока // Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии: материалы научно-практической конференции. Омск: ОмГУПС, 2003. С. 302–305.
7. Кремер Н. Ш., Путко Б. А. Эконометрика. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 311 с.
8. Орлов А. И. Эконометрика. Москва: Экзамен, 2002. 576 с.

References

1. Feoktistov V. P., Baklanov A. A. Basics of standardization of energy consumption for electric multiple units [Osnovy normirovaniya raskhoda elektroenergii dlya elektropoezdov] // Energy inspection of structural departments of the JSC «RZD» branches: proceedings of the network research and practice conference. Omsk: OSTU, 2004. Pp. 45–47.
2. Baklanov A. A. Ways to decrease energy losses on hauling operations [Puti snizheniya raskhoda elektroenergii na tyagu poezdov v ekspluatatsii] // Resource-saving technologies on enterprises of the West-Siberian Railway: proceedings of the research and practice conference. Omsk: OSTU, 2001. Pp. 87–95.
3. Sidorova E. A. System for recording and analysis of performance indicators [Sistema ucheta i analiza pokazateley ekspluatatsionnoy raboty] // Railway Transport. 2005. No. 11. Pp. 30–32. ISSN 0044–4448.
4. Energy strategy of the «Russian Railways» holding for the period up to 2020 and for the perspective up to 2030 [Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda]. Moscow: JSC «RZD», 2016. 76 p.
5. Litvintsev V. G., Raevskiy N. V., Kryukov A. V. Creation of model for forecasting traction power consumption on the basis of interval regression [Postroenie modeli prognozirovaniya tyagovogo elektropotrebleniya na osnove interval'noy regressii] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2010. No. 4 (28). Pp. 192–196. ISSN 1813–9108.
6. Maslov G. P., Magay G. S., Litvintsev V. G. Influence of driving speed of trains on specific power consumption on railway sections electrified with alternating current [Vliyanie skorosti dvizheniya poezdov na udel'nyy raskhod elektricheskoy energii na uchastkakh elektricheskoy zheleznoy dorogi peremennogo toka] // Modern tendencies in development and design of commutator and other electromechanical energy converters: proceedings of the research and practice conference. Omsk: OSTU, 2003. Pp. 302–305.
7. Kremer N. Sh., Putko B. A. Econometrics [Ekonometrika]. Moscow: UNITY-DANA, 2002. 311 p.
8. Orlov A. I. Econometrics [Ekonometrika]. Moscow: Examination, 2002. 576 p.

Объем статьи 0,42 авторских листа

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)

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)

Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии,

перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

Назначение платежа: «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций,

повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67

или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusnikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2022 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2022 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 1 (72), 2022 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 30.03.2022 Выход в свет 15.04.2022

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–60) Формат 60×90/8

Цена 473,56 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 17

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2022