

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Научно-технический журнал

Периодичность: 6 номеров в год

Издается с января 1942 г.

ISSN 2223 – 9731, индекс 70116

Международный редакционный совет

В. В. Степов (председатель, канд. экон. наук,

АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),

В. Е. Фортон (д-р физ.-мат. наук, проф.,

академик РАН, президент РАН, Москва,

Россия),

Б. М. Лапидус (д-р экон. наук, проф.,

ОАО «РЖД», Москва, Россия),

К. Эсвельд (проф. железнодорожной

инженерии, Технологический университет

Делфта, Зальтбommel, Нидерланды),

И. Г. Горячева (д-р физ.-мат. наук, проф.,

академик РАН, Институт проблем механики

им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия),

С. Куммер (д-р экономики, проф., Венский

экономический университет, Институт

транспорта и логистики, Вена, Австрия),

Н. А. Махутов (д-р техн. наук, проф.,

член-корреспондент РАН, Институт

машиноведения им. А. А. Благодрава РАН,

Москва, Россия),

В. И. Колесников (д-р техн. наук, проф.,

академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия),

В. Ф. Ушкалов (д-р техн. наук, член-

корреспондент НАН, Институт технической

механики НАН, Днепрпетровск, Украина),

К. П. Шенфельд (д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ»,

Москва, Россия),

Г. С. Фокс-Рабинович (д-р техн. наук,

Университет Макмастера, Гамильтон, Канада),

Б. А. Левин (д-р техн. наук, проф., МИИТ,

Москва, Россия),

В. И. Сенько (д-р техн. наук, проф.,

Белорусский государственный университет

транспорта, Гомель, Республика Беларусь),

А. С. Назаров (канд. техн. наук, ОАО «РЖД»,

Москва, Россия),

Д. А. Мачерет (д-р экон. наук, проф.,

АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),

Б. Е. Дынькин (д-р техн. наук, проф., РГУПС,

Ростов-на-Дону, Россия),

Е. Н. Розенберг (д-р техн. наук, проф.,

ОАО «НИИАС», Москва, Россия),

А. В. Смольянинов (д-р техн. наук, проф.,

УрГУПС, Екатеринбург, Россия),

Ли Сюэвей (д-р наук, проф., президент

Университета Далинь Дзяотон, Далинь,

Китайская Народная Республика)

Редакционная коллегия

А. Б. Косарев (председатель, д-р техн.

наук, проф.),

М. М. Железнов (канд. техн. наук, доцент),

Ж. Е. Бедова (секретарь),

С. М. Захаров (д-р техн. наук, проф.),

Д. В. Ермоленко (д-р техн. наук, доцент),

Г. В. Гогричани (д-р техн. наук),

А. В. Котельников (д-р техн. наук, проф.),

А. Я. Коган (д-р техн. наук, проф.),

В. А. Ивницкий (д-р техн. наук, д-р физ.-мат.

наук, проф.),

В. А. Кучумов (д-р техн. наук, проф.),

Е. А. Макарова (д-р экон. наук),

Л. А. Мугинштейн (д-р техн. наук, проф.),

Е. А. Шур (д-р техн. наук, проф.),

Б. Э. Глюзберг (д-р техн. наук, проф.),

О. Ф. Мирошниченко (д-р экон. наук, проф.)

Главный редактор — Ж. Е. Бедова.

Перевод на английский — А. В. Шатов.

Учредитель — АО «Научно-исследовательский

институт железнодорожного транспорта».

Журнал включен в Российский индекс

научного цитирования (РИНЦ). Статьи

рецензируются.

© «Вестник научно-исследовательского

института железнодорожного транспорта»

(«Вестник ВНИИЖТ»), Москва, 2016

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Вестник ВНИИЖТ | Том 75, 2/2016

СОДЕРЖАНИЕ

Применение оптимизационных алгоритмов

для усовершенствования конструкции стрелочных переводов

Б. Э. Глюзберг 67 – 73

Электромагнитные процессы в системе тягового снабжения 2×25 кВ с отсоединенными от рельсового пути опорами контактной сети

А. Б. Косарев 74 – 81

Автоматизированная система учета пассажиров, совершивших противоправные действия в поездах формирования АО «ФПК», и предоставления информации для поездных бригад

А. Т. Сунгатуллина, И. Б. Гумина, В. А. Добычина 82 – 87

Электроэрозия электрических контактов

В. Я. Берент 88 – 96

Сравнительная оценка методов мониторинга водных объектов, потенциально опасных для железнодорожного пути

С. Ю. Завьялов 97 – 101

Многокритериальная оценка качества отбора персонала по управлению безопасностью труда на предприятиях ОАО «РЖД»

В. М. Пономарев, И. А. Косарев 102 – 107

Изучение влияния параметров транспортного сервиса на уровень удовлетворенности пассажиров на основе моделирования методами порядковой логистической регрессии

С. С. Пастухов 108 – 115

Совершенствование ультразвукового контроля осей колесных пар подвижного состава железных дорог

А. Н. Киреев, В. А. Витренко 116 – 122

Пример расчета времени, скорости и пути торможения вагона на участке второй тормозной позиции сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины

Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко 123 – 128

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-35600 от 17.03.2009.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Редакция не несет ответственности

за содержание рекламных материалов.

Адрес учредителя, издателя, редакции

журнала «Вестник ВНИИЖТ»:

129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.

Тел. (499) 260-43-19.

Подписано к печати 29.04.2016.

Дата выхода в свет 3.06.2016.

Формат бумаги 60×90 1/8.

Офсетная печать. Усл. печ. л. 8.

Тираж 600 экз. Заказ 736.

Отпечатано в ООО «Типография Парадиз»,

143090, Московская обл.,

г. Краснознаменск, ул. Парковая, д. 2а.

Тел. (495) 755-24-10.

Цена свободная.

Vestnik VNIIZhT

Vestnik of the Railway Research Institute

Vol. 75, 2/2016

Contents

Application of optimization algorithms to improve the design of turnouts

by B. E. Glyuzberg 67 – 73

Electromagnetic processes in traction supply system of 2x25 kV with catenary supports disconnected from the railway track

by A. B. Kosarev 74 – 81

Automated system of passenger accounting, committed illegal actions in trains of JSC "FPK" formation, and provision of information to train crews

by A. T. Sungatullina, I. B. Gumina, V. A. Dobychna 82 – 87

Electroerosion of electric contacts

by V. Ya. Berent 88 – 96

Comparative evaluation of methods of monitoring of water objects, potentially dangerous for the railway track

by S. Yu. Zavyalov 97 – 101

Multicriteria assessment of selection quality of personnel on safety management for work at the enterprises of JSC RZD

by V. M. Ponomarev, I. A. Kosarev 102 – 107

Study on influence of transport service parameters on the level of passenger satisfaction on the basis of modeling by methods of ordinal logistic regression

by S. S. Pastukhov 108 – 115

Improvement of ultrasonic inspection of wheelset axles of railway rolling stock

by A. N. Kireev, V. A. Vitrenko 116 – 122

An example of calculating time, speed and brake way of the car on the site of the second braking position at the hump yard under the influence of small crosswinds

by Kh. T. Turanov, A. A. Gordienko 123 – 128

Editorial Board:

Alexander B. Kosarev
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Maksim M. Zheleznov
(Cand. Sci. (Eng.)),
Sergey M. Zakharov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Dmitriy V. Ermolenko
(Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof.),
Georgy V. Gogrichiani
(Dr. Sci. (Eng.)),

Alexander V. Kotelnikov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Alexander Ya. Kogan
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Victor A. Ivitsky
(Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci.
(Phys. and Math.), Prof.),
Vladislav A. Kuchumov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Elena A. Makarova
(Dr. Sci. (Econ.)),

Lev A. Muginshtein
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Evgeniy A. Shur
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Boris E. Glyuzberg
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Olga F. Miroshnichenko
(Dr. Sci. (Econ.), Prof.)

Editor-in-Chief: Joan E. Bedova

E-mail: journal@vniizht.ru
Translated by Alexander V. Shatov
Passed for printing 29.04.2016
Format 60x90 1/8. Circulation 600 copies

Editorial office: 10, 3rd Mytischinskaya,
129626 Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 260 4319.
Print: "Printing-office Paradiz LTD".
info@paradiz.ru.

Vestnik VNIIZhT

is published six times per year
ISSN 2223 – 9731

A peer reviewed scientific
and technological journal

Publisher:

JSC Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"),
Moscow, Russian Federation
www.vniizht.ru

International Advisory Board:

Victor V. Stepov,

Cand. Sci. (Econ.), General Director of JSC "VNIIZhT",
Master's degree in business administration (MBA)
in Stockholm School of Economics, Moscow, Russian
Federation

Vladimir E. Fortov,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of the
Russian Academy of Sciences (RAS), President of the
Russian Academy of Sciences, Director of United High
Temperature Institute of RAS, Moscow, Russian Federation

Boris M. Lapidus,

Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chairman of Joint Scientific
Council RZD, Chairman of International Board on Railway
research (IRRB) of UIIC, Guest professor of Stockholm
School of Economics, Moscow, Russian Federation

Coenraad Esveld,

Prof., Dr. of railway engineering of Delft Technical
University, General Director of "Esveld Consulting
Services", Zaltbommel, Netherlands

Irina G. Goryacheva,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of
the RAS, Head of laboratory for tribology, Institute for
Problems in Mechanics of the RAS, Moscow, Russian
Federation

Sebastian Kummer,

Univ. Prof. Dr. (Econ.) of Vienna University of Economics
and Business, Head of Institute of Transport and Logistics,
Vienna, Austria

Nikolay A. Makhutov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member of the
RAS, Head of the scientific school "Safety and security
of critically and strategically important objects of
infrastructure" of Research Institute for Machine Science
named after A.A. Blagonravov of the RAS (IMASH RAS),
Moscow, Russian Federation

Vladimir I. Kolesnikov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian
Academy of Sciences, Rostov state university of railway
engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian Federation

Victor F. Ushkalov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, corresponding member of the
National Academy of Science of Ukraine, division head of
statistics for kinetics of material system of the Institute of
Technical Mechanics, Dnepropetrovsk, Ukraine

Konstantin P. Shenfeld,

Dr. Sci. (Eng.), Executive director of JSC "VNIIZhT",
Moscow, Russian Federation

Herman S. Fox-Rabinovich,

Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of McMaster University
Engineering, Hamilton, Ontario, Canada

Boris A. Levin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, rector of the Moscow State
University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russian
Federation

Li Xuewei,

Dr. Sci., Professor, President of Dalian Jiaotong University,
Vice-President of Engineering Union of China Transport
system, Party Member of CPC group of Ministry
of Education (Dalian University, China)

Benjamin I. Senko,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, rector of the Belorussian State
University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Alexander S. Nazarov,

Cand. Sci. (Eng.), Head of technical policy department
JSC RZD, Moscow, Russian Federation

Dmitriy A. Macheret,

Dr. Sci. (Econ.), Professor, JSC "VNIIZhT", Joint Research
Council of JSC RZD, Moscow, Russian Federation

Boris E. Dynkin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored President of
international association of transport universities of
Asian-Pacific countries (IATU APC), Rostov state university
of railway engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian
Federation

Efim N. Rozenberg,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, First deputy Director General
of JSC Design & Research Institute for Information
Technology, Signaling and Telecommunication on Railway
Transport (JSC NIIS), Moscow, Russian Federation

Alexander V. Smolyaninov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of department "Wagons" of Ural
State University of Railway Transport, Yekaterinburg,
Russian Federation

© JSC Railway Research Institute, Moscow 2016

УДК 625.151

Применение оптимизационных алгоритмов для усовершенствования конструкции стрелочных переводов

Б. Э. ГЛЮЗБЕРГ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Одной из важнейших задач по совершенствованию технических средств инфраструктуры железных дорог является их оптимизация. В статье рассмотрены постановки и алгоритмы решения задач по оптимизации элементов стрелочных переводов уже на стадии проектирования.

Классифицированы четыре типа задач: оптимизация общих размеров узлов; оптимизация элементов, отказы которых определяются условиями контакта с колесами подвижного состава; оптимизация форм специальных элементов стрелочных переводов, изготавливаемых из прокатных спецпрофилей; оптимизация элементов в случае, когда конструктивные изменения, целесообразные с позиции подходов механики деформированного твердого тела, не могут быть реализованы по технологическим причинам и особенностям компоновки узлов.

Даны рекомендации по математическому аппарату, который целесообразно использовать для решения задач каждого типа. Приведены примеры практического применения предлагаемых методик, позволившие получить значимый экономический эффект.

Методики и реализующие их алгоритмы построены на принципах параметрической оптимизации. Они имеют общий характер. Аналогичные методики и алгоритмы могут быть использованы для решения большого числа задач по оптимизации технических средств железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: стрелочные переводы; методы оптимизации; типы оптимизационных задач; способы поиска оптимумов; примеры реализации

Введение. В настоящее время ведутся работы по созданию нового (пятого) поколения стрелочной продукции для Российских железных дорог. Разрабатываются модельные ряды стрелочных переводов для скоростного и высокоскоростного движения, для линий с интенсивным движением тяжеловесных поездов, ресурсосберегающие конструкции [1].

Стрелочные переводы, как одно из важных технических средств инфраструктуры железных дорог, должны соответствовать потребностям перевозочного процесса. Для этого их модельные ряды, конструкция и эксплуатационные качества должны обеспечивать оптимум требований к устройству и содержанию геометрии рельсовой колеи (ширины колеи, желобов, ординат и т. д.), нормативам износа, ресурсным характеристикам. Одновременно необходимо

минимизировать затраты на изготовление элементов стрелочных переводов [2].

Предлагаемая читателю работа посвящена рассмотрению одного из вопросов оптимизации — оптимизации конструкции элементов и узлов стрелочных переводов. Вопросы оптимизации модельных рядов, унификации конструктивных элементов и другие вопросы структурной оптимизации стрелочной продукции планируется рассмотреть в дальнейших публикациях.

Современные технологии проектирования должны основываться на оптимизации проектируемого объекта. Основу методов оптимизации составляют алгоритмы, используемые для нахождения оптимумов. Такие алгоритмы дают математические методы поиска глобальных и локальных экстремумов [3].

Использование математического аппарата поиска оптимума требует построения целевой функции, определения области ее существования и допустимых значений. Необходимый для этого комплекс исследований составляет инженерное обеспечение задачи оптимизации. В решении конкретных прикладных задач проектирования инженерное обеспечение является определяющим. Результаты инженерных исследований позволяют перейти от общей идеи оптимизации к применению математических или логических алгоритмов нахождения оптимума.

Анализ алгоритмов решения научно-проектных задач по стрелочным переводам показал, что для элементов и узлов стрелочных переводов оптимизационные задачи относятся к классу задач параметрической оптимизации, поэтому понятие оптимума в работе рассматривается как достижение наилучшего сочетания рассматриваемых параметров [4].

Можно выделить четыре типа оптимизационных задач, различающихся по: структуре и набору оптимизируемых параметров; идеям, закладываемым в понятие оптимума; математическому (или логическому) аппарату, пригодному для реализации идеи оптимизации; зависимостям, необходимым для запуска в действие этого аппарата; комплексу инженерных исследований, необходимому для получения таких зависимостей. Соответствующие различия имеют математические постановки

■ E-mail: Glusberg@mail.ru (Б. Э. Глюзберг)

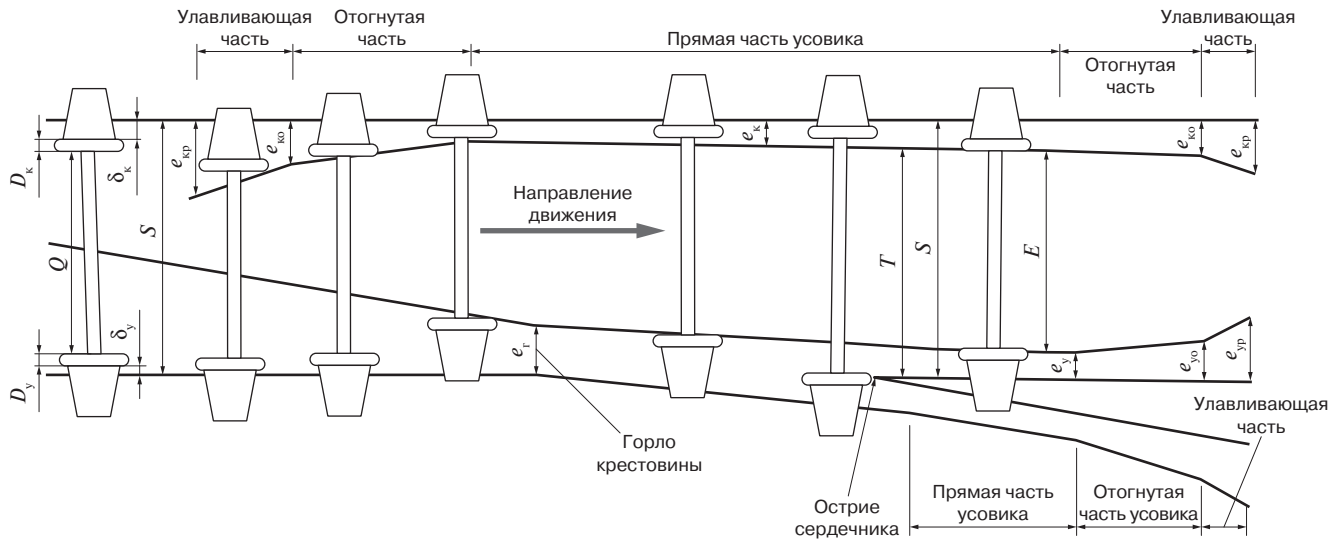


Рис. 1. Прохождение колесных пар по крестовине
Fig. 1. Wheel passage over the frog

задач и комплексы их инженерного обеспечения для каждого типа задач.

Первый тип задач — задачи по оптимизации общих размеров узлов стрелочных переводов.

К этому типу задач относятся задачи о нахождении оптимальных сочетаний размеров колеи, желобов и специальных размеров, определяющих взаимное положение элементов узла стрелочного перевода.

Пространство оптимизируемых параметров $\{\vec{S}\}$ в таких задачах представляет собой область возможных значений векторов $\vec{S} = (S, e_1, \dots, e_l, T_1, \dots, T_l)$, где S, e, T — соответственно величины ширины колеи, желобов и специальных размеров узла; l — число нормируемых параметров.

Целевая функция для этой задачи выражает условие поиска пересечения диапазонов допустимых значений нормируемых параметров (полиэкстремальная задача).

Условия функционирования узла накладывают на переменные ограничения в виде критериев безопасности, прочности, устойчивости и динамики взаимодействия пути и подвижного состава.

Математическая формулировка оптимизационной модели задачи первого типа имеет вид

$$\begin{cases} \{\vec{S} | A(\vec{S}) = 1\} \in \{\vec{S}\}, \vec{S} \in R^{1+l+t}; \\ \frac{1}{P_q(\vec{S})} - N \geq 0, q = \overline{1, n}; \\ \frac{[\sigma]_r}{\max \sigma(\vec{S})} - 1 \geq 0, r = \overline{1, m}; \\ \frac{[K_d]_u}{\max K_d(\vec{S})} - 1 \geq 0, u = \overline{1, h}, \end{cases}$$

где $A(\vec{S})$ — целевая функция; $P_q(\vec{S})$, $\sigma(\vec{S})$, $K_d(\vec{S})$ — вероятности возникновения условий нарушения безопасности движения; уровни напряжений и показателей динамики для данного значения $\vec{S}$; q, r, u — числа нормируемых показателей каждого типа; величина в квадратных скобках означает допустимое значение.

Условие $A(\vec{S}) = 1$ выражает одновременное выполнение требований всех ограничений. Для нахождения оптимума в этой задаче может быть использован любой алгоритм поиска глобального экстремума.

Величины $(\max \sigma)$ и $(\max K_d)$ могут быть получены с помощью результатов прямых экспериментов в пути либо с помощью математических моделей, описывающих взаимодействие пути и подвижного состава в пределах стрелочного перевода.

Для определения вероятностей возникновения неблагоприятных явлений $P_q(\vec{S})$ необходимы специальные математические модели, позволяющие рассчитывать особенности движения колесных пар по стрелочному переводу, опирающиеся на статистические данные о распределениях размеров колесных пар, размеров узлов стрелочных переводов и на экспериментальные данные о корреляциях между положением колесных пар в колее и упругими деформациями взаимодействующих элементов.

Таким образом, инженерное обеспечение задачи оптимизации основных размеров узла стрелочного перевода заключается в разработке математической модели, позволяющей рассчитывать вероятности явлений, возникающих при движении колесных пар по узлу, получении статистики размеров колесных пар и размеров узла стрелочного перевода, получении экспериментальных (или расчетных) данных по

величинам напряжений в элементах узла и показателей динамики взаимодействия пути и подвижного состава на стрелочном переводе.

Современные нормы геометрических параметров стрелочных переводов для железных дорог России разрабатываются с использованием описанного выше алгоритма. Иллюстрацией его применения может служить решение задачи о размерах желобов контррельсовых узлов. (Задача является частью задачи о размерах колеи и желобов в крестовинных узлах.)

На рис. 1 приведена схема размеров крестовинно-го узла стрелочного перевода.

Аргумент целевой функции представляет собой вектор из восьми компонентов — подлежащие оптимизации размеры ширины колеи (один параметр), размер желобов в лимитирующих местах контррельса (пять параметров) и предельные по безопасности расстояния от контррельса до сердечника и усовика крестовины (два параметра):

$$\vec{S} = (S, e_{кр1}, e_{ко1}, e_k, e_{ко2}, e_{кр2}, T, E).$$

Ограничения являются запреты набегания колес на улавливающую часть контррельса, на острие сердечника крестовины, на «нерабочий» усовик до горла. Вероятность этих явлений должна быть менее одного случая за планируемое число циклов прохода колесных пар N :

$$P((\delta_k + D_k)_i \geq e_{ко}) \leq \frac{1}{N},$$

$$P((e_k + T) \geq Q_i) \leq \frac{1}{N},$$

$$P((\delta_y + D_y)_i \geq e_r) \leq \frac{1}{N}, i = 1, \dots, N.$$

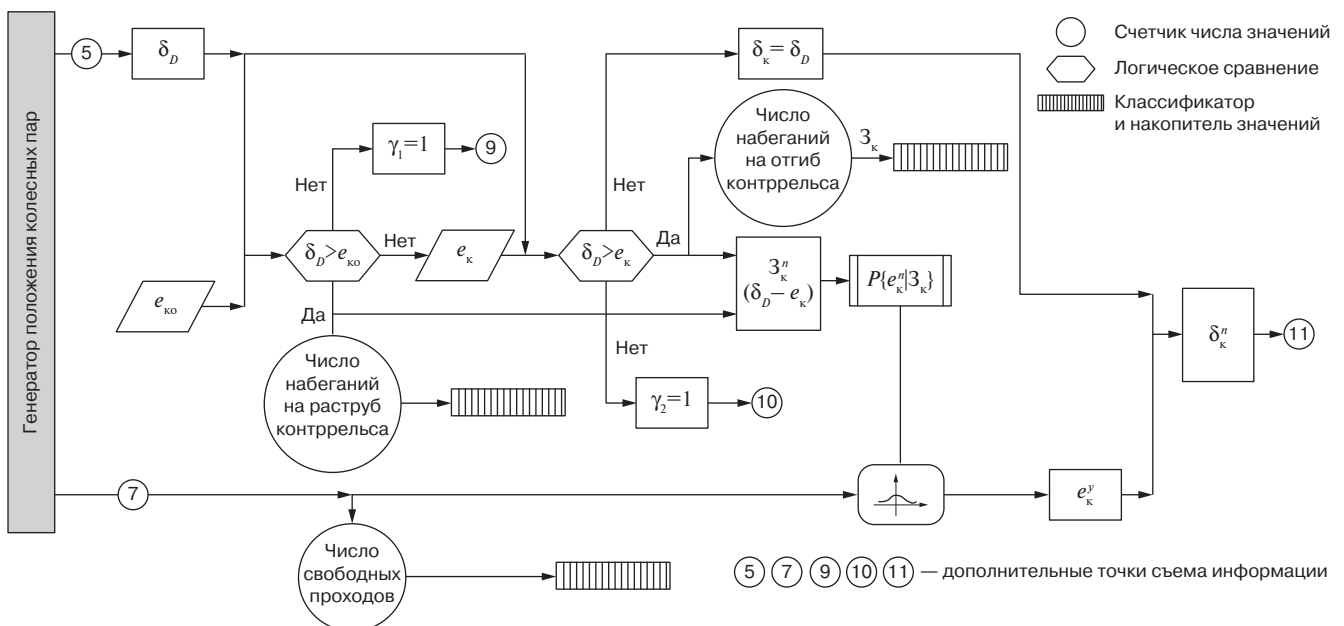


Рис. 2. Анализ явления в желобе контррельса
Fig. 2. Event analysis in the flangeway of guard rail

Помимо этого, должна обеспечиваться прочность контррельса в наиболее нагруженных точках: $\max \sigma(\vec{S}) \leq 330 \text{ МПа}$.

Инженерное обеспечение задачи состоит в определении напряжений в контррельсах при различном положении колес в желобе и построении методики определения вероятностей неблагоприятных явлений при проходе колес через крестовину. Зависимость напряжений в контррельсе от положения колес определялась экспериментально, непосредственно в пути.

Вероятности рассчитывались двумя способами — прямым расчетом по «методу условных вероятностей» и с помощью статистического эксперимента на ЭВМ. Модель для проведения статистического эксперимента показана на рис. 2.

Результаты оптимизации и адекватность модели проверена экспериментально. Результаты проверки иллюстрирует рис. 3.

Хорошая сходимость результатов позволила использовать методику решения задач по оптимизации геометрических размеров для всех стрелочных переводов.

Второй тип задач, возникающих при проектировании стрелочных переводов, — оптимизация элементов узла в случае, когда отказы элемента вызываются износом и дефектами контактно-усталостного происхождения. К этому типу задач относятся задачи по проектированию оптимальных профилей рабочих поверхностей крестовин и остриев стрелочных переводов. Цель оптимизации профиля рабочей поверхности элемента заключается в получении максимальной его наработки до отказа.

Пространство оптимизируемых параметров ($\vec{\Pi}$) в такой задаче представляет собой область значений

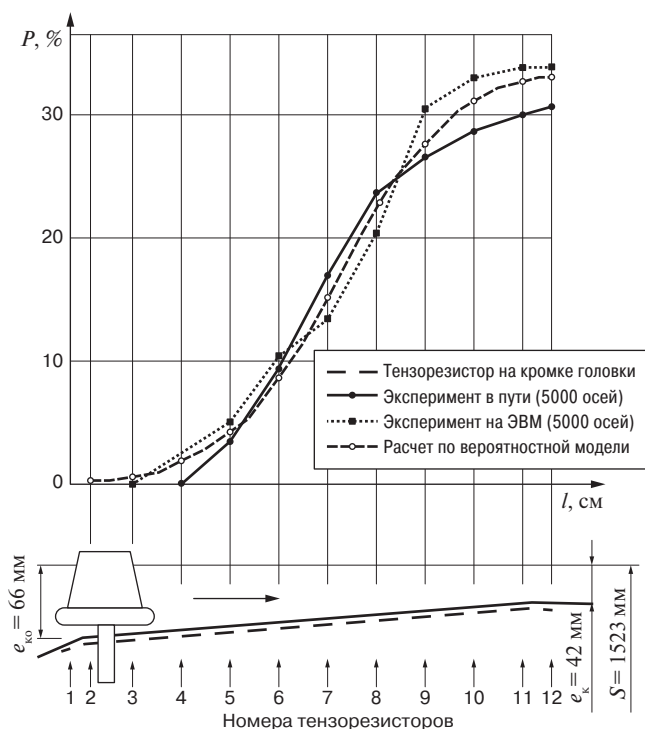


Рис. 3. Вероятность набегания колес на контррельс
Fig. 3. Probability of wheel climbing on guard rail

координат точек профилей рабочих поверхностей элемента $\bar{P} = [P_1(T=0), \dots, P_n(T=0)]$, где $P_n(T=0)$ — координаты профиля рабочей поверхности элемента в n характерных точках нового элемента (при наработке $T=0$).

Технология изготовления элемента или особенности его работы в пути требуют взаимосвязи между отдельными координатами рабочих поверхностей. Эти взаимосвязи накладывают на переменные ограничения. Другой тип ограничений выражает условие отсутствия или ограничения размеров и вида повреждений в элементе. Математическая формулировка оптимизационной модели для таких задач имеет вид

$$\begin{cases} \min \{-T_n[\bar{P}(T=0)]\}, \bar{P} \in R^n; \\ P_i(T=0) - \psi_{ij}[\bar{P}(T=0)] = 0; i, j = \overline{1, n}; \\ 1 - \varphi_m(T) \geq 0 | m = \overline{1, n}; \\ 0 \leq T \leq T_n, \end{cases}$$

где T_n — целевая функция (наработка до нормируемого износа); ψ_{ij} — функция взаимосвязи координат профиля в точках i и j ; φ_m — функция, характеризующая накопление повреждений.

Для решения задач второго типа целесообразно использовать алгоритмы нелинейного программирования. В отличие от ранее рассмотренной для этой задачи основная трудность реализации оптимизационных алгоритмов заключается в вычислении функций износа и поврежденности для каждого значения компонент вектора $\bar{P}$. Поэтому инженерное обеспечение задачи

оптимизации форм рабочих поверхностей элемента (по условию его максимально возможной наработки на отказ по износу и дефектам) состоит в изучении процессов износа и повреждаемости и построении их математических моделей, позволяющих расчетным путем определять функции износа и повреждаемости в процессе работы элемента в пути при любом первоначально задаваемом профиле его рабочих поверхностей $\bar{P}$ ($T=0$). При этом математические модели износа и повреждаемости должны учитывать вероятностный характер воздействия колес подвижного состава на элементы стрелочного перевода, характеристики которого получаются с использованием моделей движения колесных пар через соответствующий узел. Для этого могут быть использованы модели, разработанные для решения первого типа задач.

Алгоритм оптимизации апробирован на разработке геометрии рабочих поверхностей крестовин массового производства для стрелочных переводов Российских железных дорог [5].

В качестве инженерного обеспечения алгоритма использовались зависимости износа и дефектообразования в зоне контакта крестовины с колесами от главного фактора, их определяющего [6]. Главный фактор определялся с помощью факторного анализа (по методу Л.Л.Терстоуна (L. L. Thurstone)) с дальнейшей его идентификацией на основе прямых испытаний.

Из 10 факторов, в наибольшей степени влияющих на работу крестовин, главным является «суммарное динамическое воздействие». Силы в контакте колеса — крестовина для расчета главного фактора в каждом сечении крестовины определялись расчетным путем на основе модели динамики взаимодействия пути и экипажа, описываемой системой нелинейных дифференциальных уравнений (до 10-го порядка).

Вероятность возникновения повреждений определялась на основе принципа суммирования повреждений [7]. Зависимости износа от величины действующих сил получены по результатам наблюдений за работой партий крестовин в различных условиях эксплуатации.

Задача решалась в статистическом аспекте с учетом реального разброса значений характеристик металла и технологических особенностей изготовления крестовин. В качестве математического обеспечения алгоритма оптимизации использовался метод скользящего допуска.

Результаты оптимизации апробированы с помощью наблюдений за специально выпущенными партиями крестовин (показаны на рис. 4 и 5), подтвердивших эффективность найденного технического решения.

К третьему типу оптимизационных задач, возникающих при проектировании узлов стрелочных переводов, относится оптимизация форм специальных

элементов стрелочных переводов, изготавливаемых методом прокатки. Это задачи о проектировании профилей поперечных сечений острякового, контрольного и других видов проката, а также отливок, используемых при изготовлении стрелок и крестовинных узлов.

Цель этой оптимизации заключается в минимизации расхода материала на изготовление элемента при обеспечении заданной его прочности.

Параметры поперечных сечений оптимизируемых элементов стрелочных переводов целесообразно задавать в виде набора размеров, привязанных к определенной системе координат. При таком подходе пространство оптимизируемых параметров $\{\vec{B}\}$ состоит из векторов $\vec{B} = [b_1(y), \dots, b_n(y)]$, где y — уровень, на котором задается размер b ; n — число точек разбиения сечения.

Ограничениями в данном случае являются критерии прочности элемента, условия его размещения в узле и определяющие соотношения размеров.

Математическая формулировка оптимизационной модели задачи третьего типа выглядит так:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^{n-1} 0,5(b_i + b_{i+1})\Delta y_i, i = \overline{1, n}; \\ [\vec{\sigma}] - \vec{\sigma}(\vec{B}) \geq 0, \vec{B} \in R^n; \\ \vec{K}_{1,2} \geq \vec{B} \geq \vec{K}_2, \end{cases}$$

где $\vec{K}_{1,2}$ — ограничения размеров, определяющие допускаемые граничные соотношения; $\vec{\sigma}$ — напряжения, действующие в элементе; b_i — ширина сечения на уровне y_i .

Для нахождения оптимума в этой задаче целесообразно использовать алгоритм поиска локально оптимальных форм.

Такой расчет может быть произведен с помощью математических моделей напряженно-деформированного состояния элемента, которые могут быть разработаны, например, с использованием метода конечных элементов или метода граничных интегральных элементов.

В случаях когда необходим анализ напряженно-деформированного состояния элемента при подвижных нагрузках, наиболее целесообразным путем является разработка специальных моделей элементов, опирающихся на конкретизированные модели механики деформированного твердого тела.

Инженерное обеспечение задачи оптимизации заключается в выборе подхода и построении математической модели напряженно-деформированного состояния элемента, а также в определении параметров ограничений предельных размеров элемента.

Примером применения оптимизационного алгоритма третьего типа является оптимизация пластин-

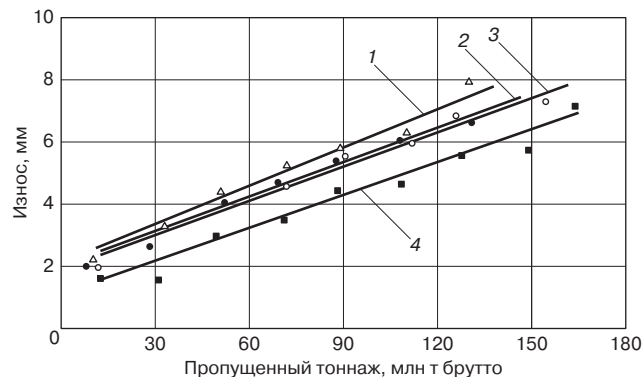


Рис. 4. Износ усовиков крестовин с различными вариантами рабочих поверхностей:
1 — исходный вариант; 2, 3 — профили по принципу «припуск на наклон»; 4 — оптимизированный профиль
Fig. 4. Wing wear of frogs with different options of working surfaces:
1 — reference sample; 2, 3 — “allowance for cold hardening” profile; 4 — optimized profile

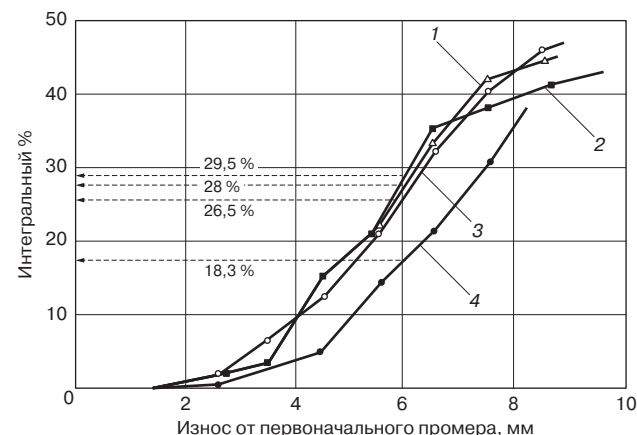


Рис. 5. Поражаемость крестовин выкрашиваниями:
1 — исходный вариант; 2, 3 — профили по принципу «припуск на наклон»; 4 — оптимизированный профиль
Fig. 5. Frog perishability to spalling:
1 — reference sample; 2, 3 — “allowance for cold hardening” profile; 4 — optimized profile

чатых контрольных прокатных спецпрофилей. Для получения инженерного обеспечения задачи оптимизации была разработана методика расчета напряжений в контроле из спецпрофиля. Контроль рассматривался в виде пластины Кирхгофа — Лява с отдельным изучением напряженно-деформированного состояния вблизи точки контакта колеса и контроля [8].

Целевая функция выражает минимизацию площади сечения пластины $\sum_{i=1}^{n-1} 0,5(b_i + b_{i+1})\Delta y_i$.

Ограничения по прочности имеют вид $\max \sigma(x, y) \leq 330$ МПа [9]. Ограничения по размерам определяются способом закрепления контроля в узле.

Исходное и оптимизированное сечения проката РК65 показаны на рис. 6. Аналогичным образом были оптимизированы и прокатные спецпрофили РК50 и РК75. Прямая экономия металла по результатам оптимизации составила 10–13%.

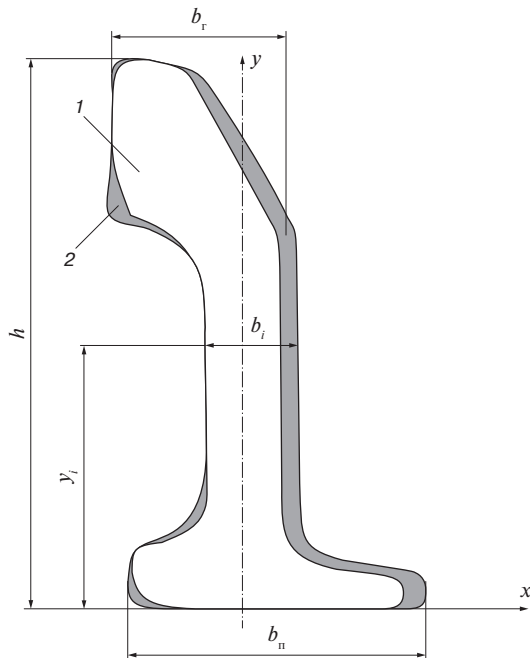


Рис. 6. Контрольный спецпрофиль РК65:
1 — оптимизированный профиль; 2 — исходный профиль
Fig. 6. Special guard rail profile RK 65:
1 — optimized profile; 2 — reference profile

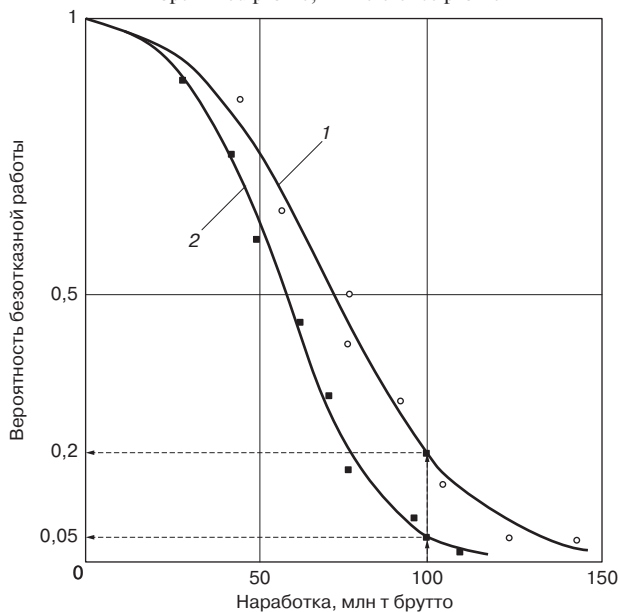


Рис. 7. Вероятность безотказной работы литой части крестовин:
1 — оптимизированный вариант; 2 — исходный вариант
Fig. 7. The probability of failure-free operation of cast part of frogs:
1 — optimized sample; 2 — reference sample

Четвертым типом оптимизационных задач для элементов стрелочных переводов являются задачи об их усилении в случае, когда конструктивные изменения, целесообразные с позиции подходов механики деформированного твердого тела, не могут быть реализованы по технологическим причинам, особенностям компоновки узлов или другим причинам. К задаче этого типа на стрелочных переводах относится в основном выбор

конструкции хвостовой части крестовины типа общей отливки сердечника и наиболее изнашиваемой части усювиков, цельнолитых и моноблочных крестовин и т. д.

Пространство оптимизируемых параметров в данном случае совпадает с пространством конструктивных решений для рассматриваемого объекта $\{\bar{A}\} = \bigcup_{i=1}^n \bar{A}_i$, где $\bar{A}_i$ — конструктивное решение, которое может быть решением задачи.

Задача решается в статистическом аспекте с учетом фактических распределений параметров прочности, получаемых в процессе изготовления изделий.

Ограничения формируются как условия выполнения требований, предъявляемых к техническому решению.

Изменение конструктивного решения влияет на распределение отказов элементов в пути, поэтому в качестве целевой функции, подлежащей минимизации, необходимо использовать функцию, связанную с интегральной вероятностью отказов элементов.

Математическая формулировка задачи оптимизации для элементов с ограниченным набором конструктивных решений имеет вид

$$\begin{cases} \min = [P(\bar{A})], \bar{A} \in \prod_{j=1}^m B_j; \\ \sum_{j=1}^m k_j(\bar{A}) - m = 0, \end{cases}$$

где m — число конструктивных и других требований к техническому решению; $k_j(\bar{A}) = 1$ при выполнении 1-го требования.

В связи с ограниченностью набора допустимых конструктивных решений поиск оптимума может быть выполнен путем непосредственного сравнения значений величины целевой функции по каждому из рассматриваемых вариантов технического решения, однако для этого необходим аппарат, позволяющий рассчитывать вероятностные распределения отказов как для существующих, так и для опытных конструктивных решений элемента.

Такой расчетный аппарат представляет собой математическую модель, которая исходя из влияния конструктивного изменения на рассматриваемые показатели (например, на уровень изгибных напряжений в хвостовой части крестовин) позволяет определять распределения отказов элементов. Построение такой модели составляет инженерное обеспечение оптимизационной задачи данного типа.

Пример применения такого алгоритма — оптимизация конструкции литой части крестовин в зоне стыков с примыкающими рельсами. Как видно из рис. 7, изменение геометрии и конструкции крестовин позволило увеличить вероятность безотказной работы (по этому виду отказов) крестовин типа Р50 при повышенных осевых нагрузках в 4 раза.

Заключение. Следует отметить, что в зависимости от особенностей работы узла или элемента возможны различные методики решения оптимизационной задачи, однако разбиение на типы задач и общая структура решения для всех узлов единообразны.

Рассмотренные оптимизационные алгоритмы успешно применяются при проектировании стрелочных переводов российского производства. Их использование позволяет экономить металл, расходующийся на изготовление прокатных спецпрофилей и литых деталей, дает возможность увеличить сроки службы, прочность и долговечность элементов стрелочных переводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глюзберг Б. Э. Стратегия исследований и разработок в области стрелочного хозяйства // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 2. С. 11 – 12.
2. Глюзберг Б. Э. Основные направления развития стрелочных переводов для ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2012. № 3. С. 18 – 23.

Application of optimization algorithms to improve the design of turnouts

B. E. GLYUZBERG

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. One of the most important tasks for improving the infrastructure facility of railways is its optimization. Currently, work is underway to create a new (fifth) generation of turnout products for Russian Railways. A model range of turnouts of resource-saving design is developed for rapid and high-speed traffic, as well as for the lines with dense traffic of heavy trains. The article describes the formulation and algorithms for solving optimization of turnout elements at the design stage.

Four types of tasks are classified: optimization of the general sizes of turnout units; optimization of elements which failures are defined by conditions of contact with wheels of a rolling stock; optimization of forms of special elements of the railway turnouts manufactured from special rolling profiles; optimization of elements in a case when constructive changes, reasonable from the approach of mechanics of the deformed solid body, cannot be realized for the technological reasons and features of configuration of units.

Recommendations about mathematical apparatus which is reasonable for using for the solution of problems of each type are made. The examples of practical application of the offered techniques which have allowed gaining significant economic effect are given.

Techniques and implementing algorithms are constructed on the principles of parametrical optimization. It has the common nature. Similar techniques and algorithms can be used for the solution of a large number of optimization tasks of technical means of railway transport.

The considered optimization algorithms are successfully applied at designing railway turnouts of Russian production. Its use allows saving the metal spent for production of special rolling profiles and cast details; it also gives the chance to increase life cycles, strength and durability of elements of railway turnouts.

Keywords: turnouts; optimization methods; types of optimization tasks; options for searching minimums; implementation examples

■ E-mail: Glusberg@mail.ru (B. E. Glyuzberg)

3. Половинкин А. И. Алгоритмы оптимизации проектных решений. М.: Энергия, 1976. 264 с.
4. Египко В. М., Акимов А. П., Горин Ф. Н. Процедуры и методы проектирования автоматизированных систем научных исследований. Киев: Наукова думка, 1982. 175 с.
5. 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.
6. Окунь Я. Факторный анализ. М.: Статистика, 1974. 200 с.
7. Коллинз Д. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.
8. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Физматгиз, 1963. 635 с.
9. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. 604 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ГЛЮЗБЕРГ Борис Эйнихович,
д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией
«Стрелочное хозяйство», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 28.12.2015 г., принята к публикации 25.01.2016 г.

REFERENCES

1. Glyuzberg B. E. *Strategiya issledovaniy i razrabotok v oblasti strelochnogo khozyaystva* [Research and development strategy for turnout facilities]. Put' i putevye khozyaystvo, 2011, no. 2, pp. 11 – 12.
2. Glyuzberg B. E. *Osnovnye napravleniya razvitiya strelochnykh perevodov dlya OAO "RZhD"* [The main directions of development of turnouts for JSC "Russian Railways"]. Zheleznodorozhnyy transport, 2012, no. 3, pp. 18 – 23.
3. Polovinkin A. I. *Algoritmy optimizatsii proyektnykh resheniy* [Algorithms for optimization of design solutions]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 264 p.
4. Egipko V. M., Akimov A. P., Gorin F. N. *Protsedury i metody proyektirovaniya avtomatizirovannykh sistem nauchnykh issledovaniy* [Procedures and methods of designing automated systems of scientific researches]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1982, 175 p.
5. Glyuzberg B. E., Kalachev A. M., Korolev V. V. *Povyshenie ekspluatatsionnykh kachestv krestovin strelochnykh perevodov za schet izmeneniya ikh geometrii v kontakte "koleso — rel's"* [Improving performance of frogs of turnouts due to changes in their geometry in contact "wheel — rail"]. Nauka i tekhnika transporta, 2004, no. 1, pp. 70 – 81.
6. Okun' Ya. *Faktornyy analiz* [Factor analysis]. Moscow, Statistika Publ., 1974, 200 p.
7. Collins D. *Povrezhdeniye materialov v konstruktsiyakh. Analiz, predskazaniye, predotvrashcheniye* [Damage to materials in structures. Analysis, prediction, prevention]. Moscow, Mir Publ., 1984, 624 p.
8. Timoshenko S. P., Voynovskiy-Kriger S. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. Moscow, Fizmatiz Publ., 1963, 635 p.
9. Kapur K., Lamberson L. *Nadezhnost' i proyektirovaniye sistem* [Reliability and system designing]. Moscow, Mir Publ., 1980, 604 p.

ABOUT THE AUTHOR

GLYUZBERG Boris Eynikhovich,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory "Turnouts and switches", JSC "VNIIZhT"

Received 28.12.2015

Accepted 25.01.2016

УДК 621.33

Электромагнитные процессы в системе тягового снабжения 2×25 кВ с отсоединенными от рельсового пути опорами контактной сети

А. Б. КОСАРЕВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. В статье обоснована возможность отказа от применения для заземления опор контактной сети рельсового пути и использования в этих целях искусственного заземлителя. Искусственный заземлитель (ИЗ) состоит из двух расположенных в земле металлических полос, на поверхности которых располагаются кабельные линии с металлическими покровами, заземляемыми на эти полосы через 1,2 – 1,5 км, но не ближе 200 м от мест подключения к ним заземляющих спусков.

Металлические полосы на тяговых подстанциях, автотрансформаторных пунктах (АП), а также в середине между двумя соседними АП подключаются к рельсовому пути либо на среднюю точку специально установленного между АП путевого дроссель-трансформатора.

При соединении троса группового заземления с арматурой опор контактной сети возможно отказаться от заземления ИЗ на путевые дроссель-трансформаторы.

Показано, что в месте короткого замыкания напряжение искусственный заземлитель — земля (рельсовый путь — земля) имеет точку максимума на каждом автотрансформаторном участке. По мере удаления первого участка от подстанции его величина снижается незначительно и для соседних участков отличается на 10 – 15%. В месте подключения ИЗ к рельсовому пути эти напряжения уменьшаются примерно на 30 – 40%.

Ключевые слова: опоры контактной сети; заземлитель; система тягового электроснабжения; автотрансформаторы; ток; напряжение

Введение. Обеспечение электромагнитной совместимости устройств СЦБ и связи с системами электроснабжения железных дорог неразрывно связано с коммутационными процессами, происходящими в тяговых сетях. Так, при разрядах токов молнии в контактную сеть часть этого тока через заземляющие спуски опор контактной сети стекает с рельсового пути, вызывая на изоляции кабельных сетей перенапряжения. Исключить появление этих перенапряжений возможно отсоединением опор контактной сети от рельсового пути. Согласно [1], опоры контактной сети индивидуально либо посредством троса группового заземления соединяются с рельсовым путем. Это объясняется необходимостью отключения токов короткого замыкания при нарушении изоляции контактной сети.

Использование рельсового пути в качестве естественного заземлителя позволяет с большой

вероятностью исключить возникновение двух- и трехфазных коротких замыканий при разряде токов молнии как в одну из фаз трехфазной воздушной линии напряжением свыше 1000 В при ее расположении на опорах контактной сети, так и при разряде токов молнии в контактную сеть.

Эти же требования к условиям заземления опор контактной сети предъявляются и к системе тягового электроснабжения 2×25 кВ с питающим проводом и автотрансформаторами (далее — СТЭ 2×25 кВ).

В ряде публикаций обоснована возможность отказа от применения для заземления опор контактной сети рельсового пути и использования в этих целях экранирующего провода (ЭП) [2, 3]. Однако система тягового электроснабжения с ЭП имеет ряд недостатков, а именно:

- отсутствуют технические решения по плавке гололеда на ЭП;
- нет токовых (дистанционных) защит, фиксирующих обрыв ЭП;
- возможно шунтирование рельсового пути при незначительных сопротивлениях растеканию железобетонных фундаментов опор и т. д.

Устранить указанные выше недостатки возможно путем использования искусственного заземлителя (ИЗ) [4, 5, 6, 7]. Металлические конструкции опор объединяются тросом группового заземления (ТГЗ) протяженностью 400 м, который в середине посредством заземляющих спусков подключается к ИЗ.

ИЗ состоит из двух расположенных в земле металлических полос, на поверхности которых располагаются кабельные линии с металлическими покровами, заземляемыми на эти полосы через 1,2 – 1,5 км, но не ближе 200 м от мест подключения к ним заземляющих спусков.

Металлические полосы на тяговых подстанциях и автотрансформаторных пунктах подключаются к рельсовому пути. Учитывая жесткие требования к надежности работы систем тягового электроснабжения на высокоскоростных участках, в частности линии Москва — Казань, необходимо соединить ИЗ со средней точкой специально установленного между АП

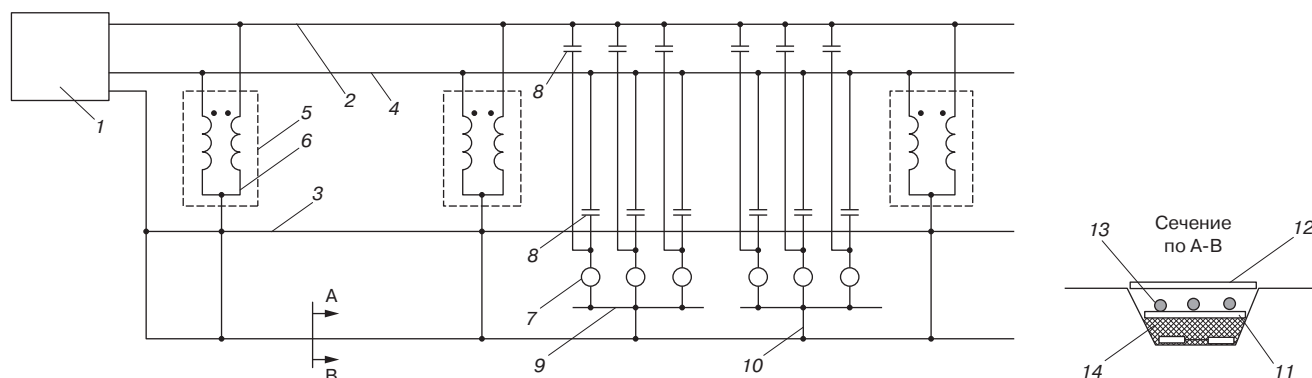


Рис. 1. Устройство заземления опор контактной сети системы тягового электроснабжения:

1—тяговая подстанция с силовыми тяговыми трансформаторами; 2—контактная сеть; 3—рельсовый путь; 4—питающий провод; 5—автотрансформаторный пункт; 6—автотрансформаторы; 7—опоры контактной сети; 8—изоляторы; 9—трос группового заземления; 10—заземляющие спуски; 11—металлические полосы; 12—проводящий бетон; 13—покровы кабельной сети; 14—слой грунта (земли)

Fig. 1. Structure of grounding of catenary supports of traction power supply system:

1—traction substation with power traction transformers; 2—catenary network; 3—railway track; 4—feeding cable; 5—autotransformer point; 6—autotransformers; 7—catenary supports; 8—insulators; 9—cable of group grounding; 10—grounding wires; 11—metallic stripes; 12—conducting concrete; 13—covers of cable network; 14—soil layer (earth)

путевого дроссель-трансформатора. Такое соединение не приводит к нарушению работы рельсовых цепей.

Предлагаемое устройство заземления опор контактной сети СТЭ 2×25 кВ с питающим проводом и автотрансформаторами представлено на рис. 1.

Устройство работает следующим образом: при нормальной работе СТЭ 2×25 кВ токи в металлических полосах практически не протекают, поскольку тяговые токи в контактной сети 2 и питающем проводе 4 равны по фазе и сдвинуты относительно друг друга на 180 град (подробное обоснование приведено ниже).

При нарушении изоляции контактной сети (питающего провода) ток короткого замыкания протекает от тяговой подстанции 1 по контактной сети 2 (питающему проводу 4), тросу группового заземления 9, заземляющему спуску 10, расположенным в земле металлическим полосам 11 и далее на тяговую подстанцию 1 по рельсовому пути 3. Входные сопротивления расположенных в земле металлических полос, в том числе и из-за их соединения у автотрансформаторных пунктов с рельсовым путем 3 и металлическими конструкциями опор (арматура фундаментов), не превышают аналогичные величины для рельсового пути. Соответствующая токовая защита автотрансформаторов 6 автотрансформаторных пунктов 5, тяговой подстанции 1 селективно отключает аварийный режим.

На металлических покровах кабельной сети 13 напряжение из-за его затухания по длине естественно-го заземлителя при грозовых разрядах ниже допустимых значений по условиям отсутствия пробоя изоляции кабелей.

При соединении ТГЗ с арматурой опор возможно отказаться от заземления ИЗ на установленные между АП путевые дроссель-трансформаторы.

Электрический расчет электротяговой сети системы 2×25 кВ на участках, где для заземления опор контактной сети используется искусственный заземлитель, сопряжен с рядом трудностей. Прежде всего это вызвано наличием магнитных связей между проводками тяговой сети, неоднородностями в местах включения автотрансформаторов, особенностями процессов стекания тока с рельсов и ИЗ в землю [6]. Естественно, что при выборе расчетной схемы замещения электротяговой сети 2×25 кВ [3] можно вводить только обоснованные упрощения, пренебрегая лишь компонентами, влияние которых на исследуемые характеристики незначительно.

Наиболее трудоемким этапом расчета электротяговых сетей является учет процесса стекания обратного тока с рельсов и ИЗ в землю, в том числе при присоединении ИЗ к рельсовому пути на тяговых подстанциях, автотрансформаторных пунктах и в середине между АП. Интенсивность этого процесса во многом определяется величинами переходных сопротивлений рельсы — земля и искусственный заземлитель — земля, которые изменяются в довольно широких пределах [2].

Исчерпывающий анализ распределения токов и напряжений в элементах электротяговой сети 2×25 кВ можно провести лишь с помощью адекватной математической модели с применением современных вычислительных комплексов, в частности Matlab, использование которого для расчета электромагнитных процессов в электрических сетях с большим числом взаимно-индуктивных связей приводит к неконтролируемым погрешностям. Вместе с тем изучение характеристик системы 2×25 кВ допустимо и на относительно простой схеме замещения (рис. 2) [8].

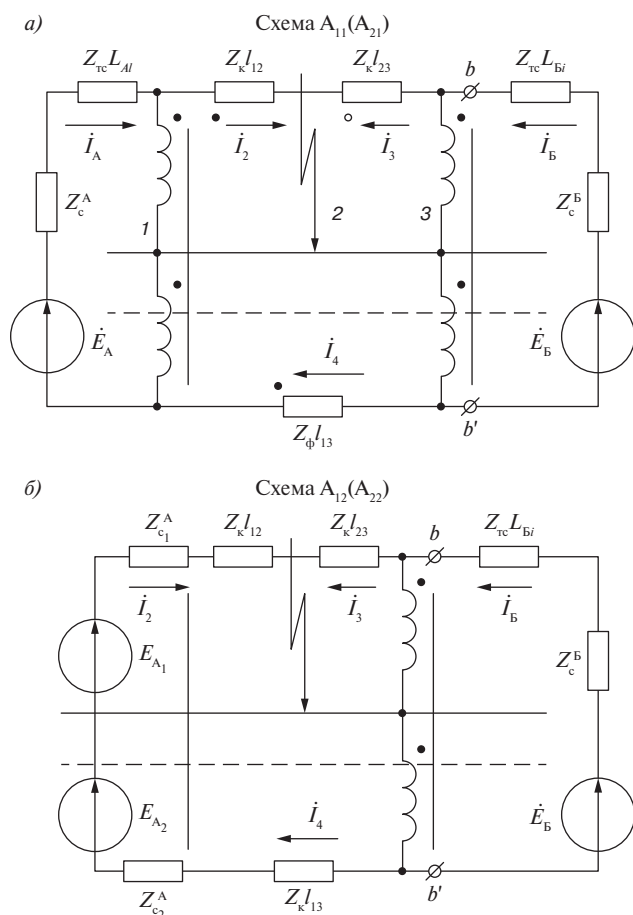


Рис. 2. Расчетные схемы замещения электротяговой сети 2×25 кВ: L_i — расстояние между подстанцией А и автотрансформатором, в обмотках которого протекают токи i_i и i_{i+1} , км; $Z_{ci(2)}^{A(B)}$ — сопротивление полуобмотки трансформатора тяговой подстанции А(Б), включающее и соответствующую часть сопротивления питающей системы, Ом

Fig. 2. Calculated equivalent circuit of electric traction network 2×25 kV:

L_i — distance between the substation A and the auto-transformer, in the coils of which flow the currents i_i and i_{i+1} , km; $Z_{ci(2)}^{A(B)}$ — resistance of a semi-winding of the transformer of traction substation A and (B) including corresponding part of resistance of the feeding system, Ohms

Далее в формулах использованы следующие величины:

z_k — удельное сопротивление контура контактная подвеска однопутного участка — земля, Ом/км;

z_{ϕ} — удельное сопротивление контура питающий провод — земля, Ом/км;

$z_{k\phi}$ — удельное сопротивление взаимоиндукции между контурами контактная сеть — земля, питающий провод-земля, Ом/км;

$Z_{ci(2)}^{A(B)}$ — сопротивление полуобмотки трансформатора тяговой подстанции А(Б), включающее и соответствующую часть сопротивления питающей системы, Ом;

$L_{Ai(j)}$ — расстояние между подстанцией А и $i(j)$ -м автотрансформатором, км;

z_{ATcv} — сопротивление автотрансформатора, Ом.

Порядок системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в электротяговой сети 2×25 кВ, определяется в первую очередь числом АП. Поэтому выбор и анализ расчетной схемы будем вести по пути ее упрощения с целью нахождения минимального количества автотрансформаторных участков, которое позволило бы получить основные зависимости в виде конечных аналитических выражений.

Установлено, что вычисление токов в элементах системы 2×25 кВ с малой погрешностью может проводиться при нулевом значении переходного сопротивления рельсы — земля. Аналогичное допущение делается и при расчетах токораспределения в традиционной системе тягового электроснабжения [9, 10].

При принятом допущении в дальнейших расчетах токораспределения под z_p следует понимать эквивалентное сопротивление, определяемое после проведения магнитной развязки [7] из соотношения

$$z_p = (z_3 - z_{M2.3})(z_2 - z_{M2.3})z_{M2.3} / ((z_3 - z_{M2.3})(z_2 - z_{M2.3}) + (z_3 - z_{M2.3})z_{M2.3} + (z_2 - z_{M2.3})z_{M2.3}),$$

где $z_{M2.3}$ — взаимное индуктивное сопротивление между контурами металлические полосы — земля и рельсовый путь — земля, Ом/км; z_3 — полное сопротивление контура металлические полосы — земля (искусственный заземлитель — земля), Ом/км; z_2 — полное сопротивление контура рельсовый путь — земля, Ом/км.

Дальнейшее исследование токораспределения проведем на примере участка электротяговой сети 2×25 кВ с пятью автотрансформаторами.

Примем следующий порядок обозначений. Автотрансформаторные участки будем нумеровать начиная с первого в направлении от тяговой подстанции А к месту короткого замыкания и далее к тяговой подстанции Б. Автотрансформаторному участку, на котором находится место короткого замыкания, присваивается номер i .

Тогда у автотрансформаторов, находящихся на границе $(i-1)$ -го и $(i+1)$ -го участков, номера соответственно j и $(j+1)$.

В настоящее время питание электротяговой сети 2×25 кВ на Российских железных дорогах осуществляется как от однофазных, так и от трехфазных трансформаторов [2, 6, 9, 10].

При использовании тяговых трансформаторов с номинальным напряжением вторичной обмотки $U_{2H} = 55$ кВ для расчета удаленного короткого замыкания схема замещения имеет вид, представленный на рис. 2, а. Если точка короткого замыкания расположена между первым автотрансформатором и подстанцией, то рассчитывается схема, представленная на рис. 2, б. Расчетные схемы приведены для участка

электротяговой сети 2×25 кВ с двусторонним питанием. При одностороннем питании в схемах на рис. 2 в точках bb' следует произвести разрыв цепи. На рис. 2 приведены условные обозначения расчетных схем. При этом в двухзначных индексах первая цифра 1 указывает на одностороннее питание участка, цифра 2 — на двустороннее.

Рассмотрим решение схемы A_{11} , которая соответствует случаю удаленного короткого замыкания на однопутном участке при одностороннем питании. Электрический расчет схемы замещения выполнен методом контурных токов. В результате решения системы уравнений получено [7, 8]

$$\begin{aligned} i_{K3} &= 2i_1 = \frac{2\dot{E}_A}{Z_{K3}}; i_3 = i_{K3} \frac{Z_{K\Phi}I_{12} + 2Z_{AT}}{Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT}}; \\ Z_{K3} &= Z_C^A + Z_{TC}L_{Ai} + 4Z_{AT} + \\ &+ 4(Z_K - \mu_1 Z_{KP})I_{12} - 4 \frac{(Z_{K\Phi}I_{12} + 2Z_{AT})^2}{Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT}} \end{aligned} \quad (1)$$

при

$$\begin{aligned} Z_{TC} &= Z_K + Z_\Phi - 2Z_{K\Phi} - Z_P(\mu_1 + \mu_2); \\ Z_{K\Phi} &= Z_K - \mu_1 Z_{KP} - \mu_2 Z_{FP} + Z_{K\Phi}; \\ Z_{K-\Phi} &= (Z_K - \mu_1 Z_{KP}) + \\ &+ (Z_\Phi - \mu_2 Z_{FP}) + 2(Z_{K\Phi} - \mu_1 Z_{FP}); \\ \mu_1 &= \frac{Z_{KP}}{Z_P}; \mu_2 = \frac{Z_{FP}}{Z_P}. \end{aligned}$$

Здесь через Z_{TC} обозначено эквивалентное сопротивление тяговой сети между автотрансформаторами $AT_{j(j+1)}$ и подстанциями А(Б). При равенстве сопротивлений взаимной индукции Z_{KP} и Z_{FP} величина Z_{TC} представляет собой сопротивление двухпроводной питающей линии контактная сеть — питающий провод. Для этого случая с незначительной погрешностью также можно принять $Z_{K\Phi} \approx Z_K$, $Z_{K\Phi} \approx Z_{K-\Phi} + Z_\Phi$. При нарушении изоляции между питающим проводом и искусственным заземлителем сопротивлений $(Z_K - \mu_1 Z_{KP})$ и $Z_{K\Phi}$ заменяются соответственно на $(Z_\Phi - \mu_2 Z_{FP})$ и $Z_{K\Phi} = Z_\Phi - \mu_1 Z_{KP} - \mu_2 Z_{FP} + Z_{K\Phi}$.

Аналогичным образом рассчитаны другие схемы замещения.

Для схемы A_{12} (рис. 2, б)

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{\dot{E}_{A1}Z_3 + \dot{E}_{A2}Z_{23}}{Z_2Z_3 - Z_{23}^2}; i_3 = \frac{\dot{E}_{A2}Z_2 - \dot{E}_{A1}Z_{23}}{Z_2Z_3 - Z_{23}^2}; \\ i_{K3} &= i_2 + i_3. \end{aligned} \quad (2)$$

В частном случае при равенстве ЭДС полуобмоток тягового трансформатора, т. е. $\dot{E}_{A1} = \dot{E}_{A2}$, имеем

$$\begin{aligned} i_3 &= i_{K3} \frac{Z_{C1}^A + Z_{K\Phi}I_{12}}{Z_C^A + Z_{K-\Phi}I_i + 4Z_{AT}}; \\ Z_2 &= Z_{C1}^A + (Z_K - \mu_1 Z_{K\Phi})I_{12}; \\ Z_3 &= Z_{C2}^A + 4Z_{AT} + Z_{K-\Phi}I_{23} + (Z_\Phi - \mu_2 Z_{FP})I_{12}; \end{aligned}$$

$$Z_{23} = (Z_{K\Phi} - \mu_1 Z_{FP})I_{12}.$$

Приведенные соотношения с погрешностью, не превышающей 5%, позволяют рассчитать токи короткого замыкания при одностороннем питании электротяговой сети. Вместе с тем приведенные выше формулы могут быть применены и для оценки распределения токов между автотрансформаторами i -го участка.

Для получения практически полной картины токо-распределения в электротяговой сети 2×25 кВ в большинстве случаев достаточно учесть только токи автотрансформаторов $(i-1)$ -го, i -го и $(i+1)$ -го участков. Указанное обстоятельство объясняется тем, что токи в тяговой сети за AT_{j+2} пренебрежимо малы, а между подстанцией и $(i-1)$ -м автотрансформаторным участком практически не зависят от сопротивления Z_{AT} .

Значения токов в контактной сети i_K и в питающем проводе i_Φ на участках $1 \dots (i-2)$ найдем, полагая $Z_{AT} = 0$. В результате решения схемы замещения с AT_{j-1} , AT_j и AT_{j+1} получено

$$\begin{aligned} i_K &= i_{K3} \frac{z_{\Phi\Phi}}{z_{K\Phi}} = i_{K3} \frac{z_\Phi}{z_K + z_\Phi}; \\ i_\Phi &= i_{K3} \frac{z_{K\Phi}}{z_{K\Phi}} = i_{K3} \frac{z_K}{z_K + z_\Phi}. \end{aligned} \quad (3)$$

Величины токов, протекающих через отсосы автотрансформаторов, определены с помощью схем замещения электротяговой сети, содержащих участки i и $(i+1)$, а также $(i-1)$ и i . В результате получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} i_{ATj-1} &= 2i_{K3} \frac{Z_{K\Phi}}{Z_{K-\Phi}} - i_{ATj} - i_{ATj+1} - i_{ATj+2}; \\ i_{ATj} &= 2i_{K3} \times \\ &\times \frac{Z_{K\Phi}I_{12}(Z_{K-\Phi}I_{i-1} + 4Z_{AT})}{(Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT})(Z_{K-\Phi}I_{i-1} + 8Z_{AT}) - 16Z_{AT}^2} - \\ &- \frac{(Z_{K-\Phi}I_i + 4Z_{AT})(Z_{K\Phi}I_{i-1} + 2Z_{AT})}{(Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT})(Z_{K-\Phi}I_{i-1} + 8Z_{AT}) - 16Z_{AT}^2}; \\ i_{ATj+1} &= 2i_{K3} \times \\ &\times \frac{(Z_{K\Phi}I_{12} + 2Z_{AT})(Z_{K-\Phi}I_{i+1} + 4Z_{AT})}{(Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT})(Z_{K-\Phi}I_{i+1} + 8Z_{AT}) - 16Z_{AT}^2}; \\ i_{ATj+2} &= 8i_{ATj+1} \frac{Z_{AT}}{Z_{K-\Phi}I_{i+1} + 4Z_{AT}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если протяженности автотрансформаторных участков разнятся между собой не более чем на 15%, то расчеты можно проводить по усредненным длинам участков l_0 .

Тогда имеем

$$\begin{aligned} i_{ATj} &= 2Z_0^{-1}(Z_{K\Phi}I_{23} + 2Z_{AT})i_{K3}; \\ i_{ATj+1} &= 2Z_0^{-1}(Z_{K\Phi}I_{12} + 2Z_{AT})i_{K3}; \\ i_{ATj-1} &= 2i_{K3} \times \end{aligned}$$

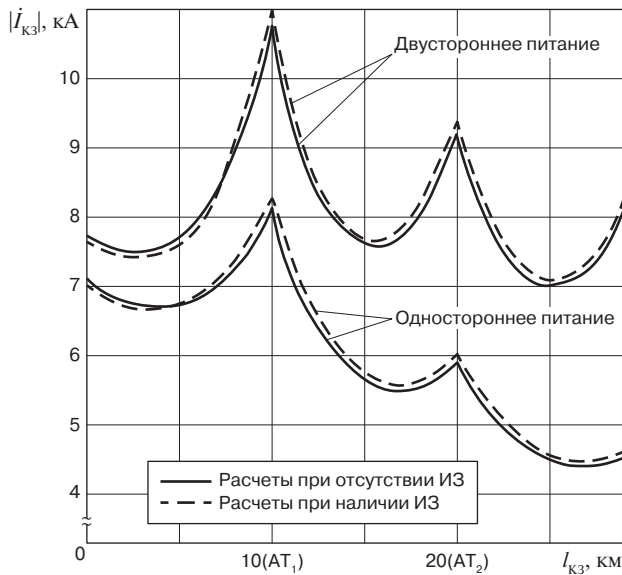


Рис. 3. Результаты расчетов токов короткого замыкания
Fig. 3. Results of calculations of short-circuit currents

$$\times \left[\frac{Z_{KЭ}}{Z_{K-Ф}} - Z_0^{-1} \left(Z_{KЭ} l_0 + 2Z_{AT} + 4Z_{AT} \frac{Z_{KЭ} l_{12} + 2Z_{AT}}{Z_{K-Ф} l_0 + 4Z_{AT}} \right) \right];$$

$$i_{ATj+2} = 8i_{ATj+1} \frac{Z_{AT}}{Z_{K-Ф} l_0 + 4Z_{AT}},$$

где

$$Z_0^{-1} = \frac{Z_{KФ} l_0 + 4Z_{AT}}{(Z_{K-Ф} l_0 + 8Z_{AT})^2 - 16Z_{AT}^2}.$$

Расчет токораспределения при двустороннем питании может быть сведен к расчету двух схем с односторонним питанием, что дает возможность использовать все полученные соотношения.

В схемах замещения A_{21} токи вычисляются по следующим формулам:

$$i_A = \frac{\dot{E}_A Z_B - \dot{E}_B Z_{AB}}{Z_A Z_B - Z_{AB}^2}; i_B = \frac{\dot{E}_B Z_A - \dot{E}_A Z_{AB}}{Z_A Z_B - Z_{AB}^2}; \quad (5)$$

$$i_A + i_B = 0,5 i_{K3};$$

$$z_{A(B)} = z_c^{A(B)} + z_{TC} L_{A(B)} + 4z_{AT} +$$

$$+ 4(z_K - \mu_1 z_{KP}) l_{12(23)} - 4 \frac{(z_{KЭ} l_{12(23)} + 2z_{AT})^2}{z_{KФ} l_i + 8z_{AT}};$$

$$Z_{AT} = \frac{(Z_{KЭ} l_{12} + 2Z_{AT})(Z_{KЭ} l_{23} + 2Z_{AT})}{Z_{K-Ф} l_i + 8Z_{AT}}.$$

В общем случае решение схемы A_{22} получается довольно громоздким. Однако, если принять условия $\dot{E}_{A1} = \dot{E}_{A2} = 0,5 \dot{E}_A$, $|(Z_{KЭ} - Z_{ФЭ}) l_i| < 5$, протяженности автотрансформаторных участков примерно одинаковыми, то токи автотрансформаторов AT_j и AT_{j-1} можно вычислить с помощью соотношений (5), а токи AT_{j-1} и AT_{j+2} находятся из следующего выражения:

$$i_{K3} = \frac{\dot{E}_A}{2z_{K3}} + \frac{\dot{E}_A - \dot{E}_B}{\Delta z_{K3}}; i_3 = i_{K3} \frac{0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12}}{z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i}; \quad (6)$$

$$z_{K3} = 0,5z_c^A + (z_K - \mu_1 z_{KP}) l_{12} -$$

$$\frac{(0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12})^2}{z_c^A + z_c^B + z_{TC} L_{AB}} - \frac{(0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12})^2}{z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i};$$

$$\Delta z_{K3} = (z_c^A + z_c^B + z_{TC} L_{AB}) \times$$

$$\times \frac{(z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i)[0,5z_c^A + (z_K - \mu z_{KP}) l_{12}]}{(z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i)(0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12})} -$$

$$\frac{(0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12})^2}{(z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i)(0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12})} -$$

$$-(0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12});$$

$$z_{KЭ}^* = z_K - \mu z_{KP} + \mu z_{ФР} - z_{KФ}.$$

Значения токов в обмотках автотрансформаторов рассчитываются по формулам

$$i_{ATj-1(j+2)} = 4i_{A(B)} \left[\frac{Z_{KЭ}}{Z_{K-Ф}} - Z_0^{-1} \times \right.$$

$$\times \left(Z_{KЭ} l_0 + 2Z_{AT} + 4Z_{AT} \frac{Z_{KЭ} l_{12(23)} + 2Z_{AT}}{Z_{K-Ф} l_0 + 4Z_{AT}} \right) \left. \right] +$$

$$+ 16i_{B(A)} Z_0^{-1} \frac{Z_{AT}}{Z_{K-Ф} l_0 + 4Z_{AT}} (Z_{KЭ} l_{23(12)} + 2Z_{AT}). \quad (7)$$

Значения токов в контактной сети и в дополнительном проводе на автотрансформаторных участках $1 \dots (i-2)$ и $(i+2) \dots n$ рассчитываются по формулам, аналогичным (7):

$$i_K^{A(B)} = 2i_{A(B)} \frac{Z_{ФЭ}}{Z_{K-Ф}} \approx 2i_{A(B)} \frac{Z_{Ф}}{Z_K + Z_{Ф}};$$

$$i_{Ф}^{A(B)} = 2i_{A(B)} \frac{Z_{KЭ}}{Z_{K-Ф}} \approx 2i_{A(B)} \frac{Z_K}{Z_K + Z_{Ф}}. \quad (8)$$

Выражения (5) и (6) приведены применительно к электротяговым сетям с тяговыми трансформаторами с $U_{2H} = 55$ кВ.

Рассмотрим общую картину распределения токов при коротком замыкании в электротяговой сети 2×25 кВ.

Кривые изменения токов для $K_{AT} = 2$ при одно- и двустороннем питании электротяговой сети имеют характер, представленный на рис. 3.

Отметим, что место короткого замыкания практически подпитывается только от автотрансформаторов i -го участка. Причем это положение справедливо для всего диапазона изменения значений коэффициентов трансформации автотрансформаторов. Поэтому при расчете токов короткого замыкания, а также определении входного сопротивления электротяговой сети 2×25 кВ с небольшой погрешностью можно учитывать только автотрансформаторы AT_j и AT_{j+1} , пренебрегая шунтирующим действием других автотрансформаторов.

При коэффициенте $K_{AT} = 2$ токи, протекающие по рельсовому пути и искусственному заземлителю между подстанциями А(Б) и i -м участком, обусловлены величиной сопротивления Z_{AT} , а также неравенством сопротивлений контактной сети и питающего провода. При реальных значениях Z_{AT} и экономически оправданных сочетаниях типов проводов величина нескомпенсированного тока на этих участках пути составляет малую долю от тока в контактной сети [2]. Поэтому в большинстве случаев с незначительной погрешностью ток короткого замыкания может быть вычислен без учета гальванической связи с рельсами отсоса тяговой подстанции А(Б). Это в свою очередь показывает, что эффективность применения ИЗ, соединенного с рельсовым путем при системе тягового электроснабжения 2×25 кВ, для повышения напряжения и снижения потери электроэнергии незначительна.

При выборе окончательных вариантов схем замещения необходимо исходить из способа питания электротяговой сети и положения точки короткого замыкания относительно тяговой подстанции А(Б) и автотрансформатора $AT_{j(j+1)}$. Это обусловлено тем, что при расчете токов короткого замыкания на первом автотрансформаторном участке и питании тяговой сети от однофазных трансформаторов с расщепленной вторичной обмоткой [2, 9] нельзя пренебрегать гальванической связью между рельсами и отсосом подстанции.

Расчет напряжений искусственный заземлитель — земля. Напряжение искусственный заземлитель — земля рассчитывается по формуле

$$\dot{U}_3 = \left(1 - \frac{z_{K.P}}{z_p}\right) \left[z_{B.P} \left(2 \dot{I}_{ATi} \left(e^{-\gamma |e_{ATi} - x|} - e^{-\gamma x} \right) \right) + \right. \\ \left. + z_{B.X.P} \dot{I}_{K3} \left(e^{-\gamma |e_{ATi} - x|} - e^{-\lambda x} \right) \right], \quad (9)$$

$$\text{где } z_{B.P} = \sqrt{\frac{z_p r_{\Pi} r_3}{r_{\Pi} + r_3}}; \gamma = \sqrt{\frac{r_{\Pi} + r_3}{z_p r_3}};$$

$$z_{B.X.P} = \frac{z_{M2.3} z'_{BX}}{z_{M2.3} + z'_{BX}}; z'_{BX} = \frac{(z_3 x + z_{B.P})(z_3(l - x) + z_{B.P})}{z_3 l + 2 z_{B.P}},$$

x — текущая координата (отсчет ведется от места подключения ИЗ к рельсовому пути), км; l — расстояние между соседними точками подключения искусственного заземлителя к рельсовому пути.

Необходимо отметить, что все выражения, описывающие токораспределение и распределение напряжений, являются функцией тока короткого замыкания, что дает возможность рассматривать полученные соотношения как результат решения схем, содержащих источники тока величиной, равной току короткого замыкания. В принципе использование приведенных выше выражений будет правомерно и для тяговых нагрузок. При нескольких электровазах, одновременно находящихся в межподстанционной зоне,

распределение токов и напряжений находится методом наложения.

Результаты расчетов напряжений искусственный заземлитель — земля в точке короткого замыкания для участка с пятью автотрансформаторами при двустороннем питании от двух однофазных трансформаторов на каждой подстанции приведены на рис. 4. Расчеты сделаны для тяговой сети типа ПБСМ1-70 + МФ-100 + А-185 с рельсами Р65 на железобетонных шпалах и при подключении к рельсам ИЗ.

Кривые изменения напряжений искусственный заземлитель — земля позволяют отметить следующие особенности распределения потенциалов в системе 2×25 кВ с отсоединенными от рельсового пути опорами контактной сети. В месте короткого замыкания напряжение искусственный заземлитель — земля имеет точку максимума $U_{3 \max}$ на каждом автотрансформаторном участке.

По мере удаления 1-го участка от подстанции величина $U_{3 \max}$ снижается незначительно и для соседних участков отличается на 10–15%. В месте подключения ИЗ к рельсовому пути эти напряжения уменьшаются примерно на 30–40%. Тем самым установлена эффективность использования предлагаемой системы заземления для уменьшения напряжений ИЗ — земля, рельсы — земля для СТЭ 2×25 кВ с отсоединенными от рельсов опорами.

Следует указать на целесообразность использования ИЗ для заземления металлических ограждений

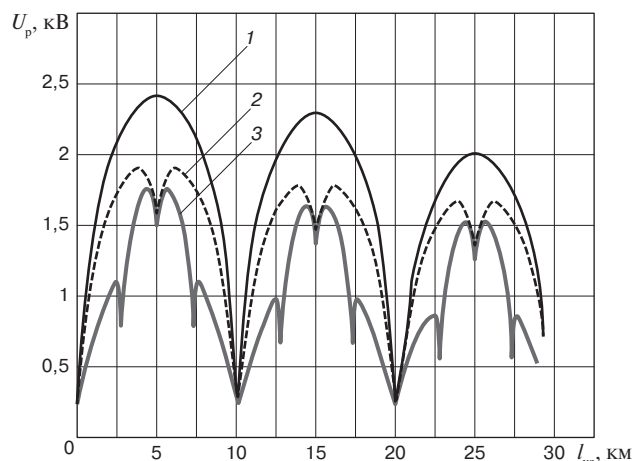


Рис. 4. Результаты расчетов напряжений искусственный заземлитель — земля в точке короткого замыкания:

1 — искусственный заземлитель подключен к рельсовому пути у автотрансформаторных пунктов; 2 — ИЗ дополнительно к 1 подключен в середине между автотрансформаторными пунктами; 3 — ИЗ дополнительно к 1 подключен в трех местах между автотрансформаторными пунктами

Fig. 4. Results of calculations of voltage in artificial grounding conductor — the earth system in a short-circuit point:

1 — the artificial grounding conductor is connected to a rail track at autotransformer points; 2 — AGC in addition to 1 is connected in the middle between autotransformer points; 3 — AGC in addition to 1 is connected in three places between autotransformer points

посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей на электрифицированных участках переменного тока.

Выводы. 1. Обоснована система заземления опор контактной сети СТЭ 2×25 кВ, в которой металлические конструкции опор объединяются тросом группового заземления протяженностью 400 м, соединенным в середине посредством заземляющих спусков с искусственным заземлителем.

2. Показано, что в месте короткого замыкания напряжение искусственный заземлитель — земля достигает максимального значения. По мере удаления 1-го участка от подстанции его величина снижается незначительно и для соседних участков отличается на 10–15%. В месте подключения ИЗ к рельсовому пути эти напряжения уменьшаются на 30–40%.

Установлена эффективность использования предлагаемой системы заземления для участков с отсоединенными от рельсов опорами и для заземления металлических ограждений посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. М.: Транспорт, 1997. 68 с.
2. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.

3. Косарев А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. М.: Интекст, 2004. 272 с.

4. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Электромагнитная совместимость устройств электропитания систем железнодорожной автоматики с тяговыми сетями // Транспорт. Наука, техника, управление. 2004. № 7. С. 31–34.

5. Шимони К. Теоретические основы электротехники. М.: Мир, 1964. 685 с.

6. Косарев А. Б., Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 348 с.

7. Косарев А. Б., Сербиненко Д. В. Грозозащита и заземление опор контактной сети в системе тягового электроснабжения с ВПП РП // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 4. С. 19–23.

8. Косарев А. Б., Логинов С. В. Повышение надежности работы устройств автоблокировки за счет отказа от использования рельсовых путей для заземления опор контактной сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 2. С. 9–12.

9. Косарев А. Б., Сербиненко Д. В. Расчет распределения грозовых перенапряжений на длине протяженного заземлителя высоковольтных линий автоблокировки и связи // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 6. С. 3–7.

10. Косарев Б. И., Косолапов Г. Н. Условия электробезопасности обслуживания рельсового пути в тяговой сети 2×2,5 кВ // Электричество. 1978. № 6. С. 32–36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

КОСАРЕВ Александр Борисович,
д-р техн. наук, профессор, заместитель Генерального
директора АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 19.01.2016 г., принята к публикации 10.02.2016 г.

Electromagnetic processes in traction supply system of 2×25 kV with catenary supports disconnected from the railway track

A. B. KOSAREV

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The article explains the possibility of refusal of application of catenary supports of railway track for grounding and use an artificial grounding conductor for this purpose. The Artificial Grounding Conductor (AGC) consists of two metal strips located in the earth on which surface there are cable lines, metal covers of which are grounded on these strips through 1,2 – 1,5 km, but not closer than 200 m from places of connection of the grounding wires to them.

Metal strips on traction substations or at the autotransformer points (AP), and also in the middle between two next AP are connected to a railway track or to the center tap of specially installed track impedance bond between APs.

When connecting a cable of group grounding with fittings of catenary support it is possible to refuse AGC grounding to track impedance bond.

It is noted that when calculating short-circuit currents between adjacent autotransformers, as well as in determining the input resistance of the electric traction network of 2 × 25 kV with a small inaccuracy it is possible to take into account only these autotransformers and neglecting shunt action of other autotransformers.

It is shown that in the place of short-circuit the voltage of the artificial grounding conductor — earth system (railway track — the earth) has a maximum point on each autotransformer section. With distance from the first section from substation the value of this voltage decreases slightly and for the next section differs in 10–15%. In the place of connection of AGC to railway track this voltage decreases approximately up to 30–40%.

Efficiency of use of the offered grounding system for sections with the supports disconnected from railway tracks, as well as for grounding of metal barriers of station platforms and metal barriers of railway tracks is established.

Keywords: catenary supports; grounding conductor; traction power supply system; autotransformers; current; voltage

■ E-mail: Kosarev.Alexander@vniizht.ru (A. B. Kosarev)

REFERENCES

1. *Instruktsiya po zazemleniyu ustroystv elektrosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh* [Instructions for grounding of power supply devices on electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1997, 68 p.
2. Kosarev A. B., Kosarev B. I. *Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* [Basics of electromagnetic safety of power supply of railway transport systems]. Moscow, Intext Publ., 2008, 480 p.
3. Kosarev A. B. *Osnovy teorii elektromagnitnoy sovmestimosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka* [Basic theory of electromagnetic compatibility of AC traction power systems]. Moscow, Intext Publ., 2004, 272 p.
4. Kosarev A. B., Kosarev B. I. *Elektromagnitnaya sovmestimost' ustroystv elektropitanii sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki s tyagovymi setyami* [Electromagnetic compatibility of power supply devices of railway automation systems with traction networks]. Transport. Nauka, tekhnika, upravlenie, 2004, no. 7, pp. 31 – 34.
5. Shimoni K. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical bases of electrical engineering]. Moscow, Mir Publ., 1964, 685 p.
6. Kosarev A. B., Kosarev B. I., Serbinenko D. V. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh energosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Electromagnetic processes in power supply systems of AC railways]. Moscow, VMG-Print Publ., 2015, 348 p.
7. Kosarev A. B., Serbinenko D. V. *Grozozashchita i zazemlenie opor kontaktnoy seti v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya s VPP RP* [Lightning protection and earthing of supports of contact network in the system of traction power with WPP of RP]. Vest-

nik VNIIZhT [Vestnik of the Railway research Institute], 2013, no. 4, pp. 19 – 23.

8. Kosarev A. B., Loginov S. V. *Povyshenie nadezhnosti raboty ustroystv avtoblokirovki za schet otkaza ot ispol'zovaniya rel'sovykh putey dlya zazemleniya opor kontaktnoy seti peremennogo toka* [Improving the reliability of automatic block devices by eliminating the use of railway tracks for grounding supports of AC contact network]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway research Institute], 2009, no. 2, pp. 9 – 12.

9. Kosarev A. B., Serbinenko D. V. *Raschet raspredeleniya grozovykh perenapryazheniy na dline protyazhennogo zazemlitelya vysokovol'tnykh liniy avtoblokirovki i svyazi* [Calculation of the distribution of storm overvoltages on the length of the extended grounding of high voltage lines of automatic lock and communication]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway research Institute], 2012, no. 6, pp. 3 – 7.

10. Kosarev B. I., Kosolapov G. N. *Usloviya elektrobezopasnosti obsluzhivaniya rel'sovogo puti v tyagovoy seti* [Conditions of electrical safety of track maintenance in the traction network]. Elektrichestvo, 1978, no. 6, pp. 32 – 36.

ABOUT THE AUTHOR

KOSAREV Aleksander Borisovich

Dr. Sci. (Eng.), Professor, deputy General Director of JSC "VNIIZhT"

Received 19.01.2016

Accepted 10.02.2016

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Косарев А. Б., Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 349 с.

Изложены методы анализа электромагнитных процессов в современных системах тягового электроснабжения и их влияние на электроустановки и электрические сети магистральных железных дорог. Обоснованы методы расчета нестационарных, в том числе и грозовых, режимов в сложных и неоднородных нелинейных цепях с переменной структурой, при представлении элементов цепи в виде линий с распределенными параметрами, носящими вероятностный характер. С привлечением методов линейной алгебры

и теории многополюсников рассмотрены матричные методы анализа энергетических соотношений в современных системах тягового электроснабжения при учете несинусоидального характера токов электропоездов. Основные технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения защищены авторскими свидетельствами и патентами на полезную модель.

Предназначена для научных работников, аспирантов. Может быть полезна инженерам-электрикам, а также студентам электротехнических специальностей высших транспортных учебных заведений.

Тюрнин П. Г., Тибилов А. Т., МIRONOS Н. В. Токосъем: надежность, экономичность и пути совершенствования. М.: ВМГ-Принт, 2015. 166 с.

В книге рассмотрены наиболее важные вопросы токосъема с учетом требований и методов проверки отдельных элементов контактной сети и токоприемников, эксплуатируемых при высокоскоростном движении. Подробно изложены отдельные решения экономичности и надежности устройств.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: железнодорожников, уже имеющих общую подготовку и практический опыт работы на контактной сети и в локомотивном хозяйстве, работников предприятий — изготовителей электроподвижного состава, а также преподавателей и студентов транспортных вузов, техникумов и колледжей.

По вопросам предварительного заказа на приобретение книг обращайтесь в редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ», тел. (499) 260-43-20.

УДК 656.043.2

Автоматизированная система учета пассажиров, совершивших противоправные действия в поездах формирования АО «ФПК», и предоставления информации для поездных бригад

А. Т. СУНГАТУЛЛИНА, И. Б. ГУМИНА, В. А. ДОБЫЧИНА

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Разработана система аналитической отчетности, обеспечивающая бизнес-процессы учета и контроля правонарушений в поездах дальнего следования и позволяющая решать задачи:

подготовки первичной информации о классификации правонарушений и пассажирах, нарушивших общественный порядок в поездах АО «ФПК»;

формирования для поездных бригад информации о проезде в поездах АО «ФПК» пассажиров, некогда совершивших противоправные действия;

формирования и выдачи справочно-аналитической информации о правонарушениях по филиалам формирования поездов.

Функциональные части нового программно-аналитического комплекса реализованы в рамках АРМ «Нарушители».

Ключевые слова: учет и контроль правонарушений; классификатор правонарушений; справочно-аналитическая отчетность по нарушителям

Актуальность решения проблемы учета и контроля правонарушений. В настоящее время железнодорожный транспорт Российской Федерации имеет ряд конкурентных преимуществ при осуществлении пассажирских перевозок по сравнению с другими видами транспорта, таких как независимость от погодных условий, следование пассажирских поездов строго по расписанию, высокая частота движения поездов на основных направлениях и т. д. [1, 2]. Однако в последние годы на железнодорожном транспорте наблюдается тенденция роста совершения пассажирами в поездах дальнего следования противоправных действий, в том числе и административных правонарушений [3].

Процесс учета и контроля правонарушений в поездах АО «ФПК» является длительным и трудоемким, так как производится путем ручного сбора и обработки информационных листов о происшествиях в пути следования, составленных начальниками поездов. Отсутствие возможности оперативной выдачи сведений для поездных бригад о едущих в поезде пассажирах,

ранее совершивших противоправные действия, затрудняет профилактику правонарушений.

Для обеспечения безопасности пассажирская компания АО «ФПК», являющаяся основным перевозчиком на сети железных дорог РФ, поставила перед разработчиками АСУ «Экспресс-3» задачу создания системы аналитической отчетности, обеспечивающей бизнес-процессы учета и контроля правонарушений в поездах дальнего следования. Основой для ее реализации стала аналитическая база данных (АБД) АСУ «Экспресс-3», обеспечивающая сбор, хранение, обработку, анализ информации обо всех пассажирских перевозках, в которых участвуют Российские железные дороги [4–6].

Практическая реализация комплекса задач учета и контроля правонарушений в поездах дальнего следования на базе АСУ «Экспресс-3». В рамках АСУ «Экспресс-3» разработан и внедрен в промышленную эксплуатацию комплекс программ, позволяющий сотрудникам подразделений АО «ФПК», занимающимся учетом правонарушений, совершенных в поездах дальнего следования, и членам поездных бригад в поездах АО «ФПК» контролировать и анализировать информацию о правонарушениях, имевших место в поездах формирования АО «ФПК». Автоматизация процесса учета и контроля правонарушений в поездах дальнего следования включает поэтапное решение следующих задач [7, 8]:

- подготовка первичной информации о классификации правонарушений и пассажирах, нарушивших общественный порядок в поездах АО «ФПК»;
- формирование для поездных бригад информации о проезде в поездах АО «ФПК» пассажиров, некогда совершивших противоправные действия;
- формирование и выдача справочно-аналитической информации о правонарушениях по филиалам формирования поездов.

На рис. 1 представлена диаграмма вариантов использования автоматизированной системы (АС) учета и контроля правонарушений в поездах АО «ФПК», выполненная в среде Rational Rose.

■ E-mail: express@vniizht.ru (А. Т. Сунгатуллина)

Автоматизированный процесс учета и контроля правонарушений в поездах дальнего следования производится на базе действующих технических средств АСУ «Экспресс-3». Срок хранения исходной информации в АБД составляет не менее 3 лет [9]. Функциональные части нового программно-аналитического комплекса реализованы в рамках АРМ «Нарушители».

АРМ «Нарушители» в подсистеме «Формирование классификатора правонарушений» обеспечивает ввод, корректировку и удаление записей, учитывающих все возможные противоправные действия пассажиров в поездах дальнего следования. В соответствии с предоставляемой АО «ФПК» информацией каждому виду правонарушения присваивается односимвольный код и условная значимость. Условная значимость представляется в баллах, начиная с более значимого правонарушения транспортной безопасности и заканчивая нарушениями санитарных норм и выбросом мусора. На рис. 2 представлен утвержденный классификатор правонарушений.

Квалифицированные сотрудники на станциях формирования и оборота поезда собирают у прибывших из рейсов начальников поездов информационные листы о нарушениях общественного порядка пассажирами, составленные сотрудниками правоохранительных органов в пути следования. Информация о правонарушениях с информационных листов вводится в АРМ «Нарушители».

Входной информацией о пассажирах, совершивших противоправные действия, в АРМ «Нарушители» в подсистеме «Ввод информации о правонарушителях» являются два блока реквизитов. Первый блок реквизитов содержит информацию по проездному документу: серия и номер проездного документа; дата отправления пассажира; номер поезда; Ф. И. О. пассажира; вид и номер документа, удостоверяющего личность, и т. д. Второй блок реквизитов содержит информацию по протоколу (информационному листу): номер, дата и место составления протокола; код (категория) правонарушения; информация о должностном лице, составившем протокол, и т. д. Информация о правонарушении пассажира является актуальной в АСУ «Экспресс-3» в течение 2 лет со дня его совершения. По номеру проездного документа (в случае его наличия у пассажира), используя данные таблиц АБД АСУ «Экспресс-3», в АРМ «Нарушители» имеется возможность автоматического заполнения всех реквизитов по данному документу: Ф. И. О. пассажира; вид и номер документа, удостоверяющего личность; дата рождения пассажира; номер поезда и дата его отправления.

В настоящее время автоматизированная система контроля посадки пассажиров в поезда дальнего следования на базе системы «Экспресс-3» (АСКПП) обеспечивает возможность выдачи через АРМ начальника

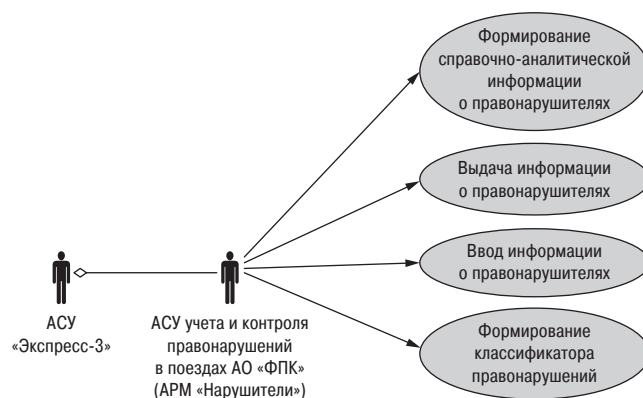


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования АСУ учета и контроля правонарушений в поездах АО «ФПК» (АРМ «Нарушители»)

Fig. 1. The diagram of options for using AS for accounting and control of wrongdoings in trains of JSC "FPC" (AWS "Disturbers")

поезда ведомостей занятия мест пассажирами с электронной регистрацией. Ведомости формируются в виде таблиц по поезду с разбивкой по каждому вагону и по местам внутри вагонов и предназначены для контроля проводниками посадки в вагоны пассажиров с электронными билетами. Дополнительным блоком данных ведомостей является информация о правонарушителях. На рис. 3 представлена форма «Ведомость занятия мест пассажирами» (в том числе только с электронной регистрацией). При наличии в поезде пассажиров, ранее совершивших противоправные действия, информация о них и о категориях ранее совершенных данным пассажиром правонарушений (до четырех) в обязательном порядке указывается после Ф. И. О. пассажира.

В связи с необходимостью достоверной идентификации пассажиров в АРМ «Нарушители» в подсистеме «Выдача информации о правонарушителях» предусмотрена возможность выдачи записей по пассажирам, совершившим ранее противоправные действия:

- по Ф. И. О. пассажира;
- по номеру документа, удостоверяющего личность.

АРМ "Нарушители"

АСУ "Экспресс-3"

Классификатор правонарушений

Код правонарушения	Дата начала действия	Дата окончания действия	Вид правонарушения	Условная значимость
Б	1900-01-01	2100-01-01	НАРУШЕНИЕ ТРАНСП. БЕЗОПАСНОСТИ (УТОЧ. ТЕРРОРИЗМ, В т.ч. ТЕЛЕФОННЫЙ)	1
А	1900-01-01	2100-01-01	НАСИЛИЕ И АГРЕССИВНОЕ ХУЛИГАНСТВО	2
И	1900-01-01	2100-01-01	ПОРЧА ИМУЩЕСТВА, ОБОРУДОВАНИЯ ВАГОНОВ, ВАНДАЛИЗМ	3
В	1900-01-01	2100-01-01	КРАЖА	4
Х	1900-01-01	2100-01-01	МЯГКОЕ ХУЛИГАНСТВО	5
П	1900-01-01	2100-01-01	РАСПИТИЕ СПОРТНЫХ НАЛИТКОВ И УПОТРЕБЛЕНИЕ НАРКОТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ	6
Э	1900-01-01	2100-01-01	ПРОЕЗД ПО ВОЗВРАЩАЮЩЕМУ ЭЛЕКТРОННОМУ БИЛЕТУ	7
К	1900-01-01	2100-01-01	КУРЕНИЕ, НАРУШЕНИЕ ПРАВИЛ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	8
Н	1900-01-01	2100-01-01	МОШЕННИЧЕСТВО (В т.ч. НЕСАЖИЦ, ТОРГОВЛЯ)	9
Э	1900-01-01	2100-01-01	БЕЗЫЛЕТНЫЙ ПРОЕЗД (ПРОВОЗ РУЧНОЙ КЛАДЬ) ПРИ ОТКАЗЕ ОПЛАТЫ	10
С	1900-01-01	2100-01-01	ПОСАДКА И ВЫСАДКА НА ХОДУ ПОЕЗДА, ПРОЕЗД НА ПОДНОЖКАХ, СРЫВ СТОП-КРАНА	11
М	1900-01-01	2100-01-01	НЕСАЖИЦ, ВЫБРОС МУСОРА, НАРУШЕНИЕ САНИТАРНОЙ ЗОНЫ	12
Г	1900-01-01	2100-01-01	НАРУШЕНИЕ ПРАВИЛ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ГОС. ГРАНИЦЫ	13
Д	1900-01-01	2100-01-01	НАРУШЕНИЕ ТАМОЖЕН. ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ГОС. ГРАНИЦЫ	14
Т	1900-01-01	2100-01-01	ДРУГИЕ ВИДЫ	15

Рис. 2. Классификатор правонарушений, утвержденный АО «ФПК»

Fig. 2. Classifier of illegal actions, approved by JSC "FPC"

СПРАВКА – 1530 10.04.09 13.00 0123456 32М11
 ПОЕЗД: 062В МОСКВА БЕЛ – СМОЛЕНСК Ц ОТПРАВЛЕНИЕ 10.04.09 13.55
 ВАГОНЫ: ВСЕ
 ВЦ: М
 ВСЕГО ДОКУМЕНТОВ: 0055
 ВЕДОМОСТЬ ПРОЕЗДНЫХ ДОКУМЕНТОВ ВЫДАНА 10.12.14 13.00 0123456 32М11
 ПОЕЗД: 062В МОСКВА БЕЛ – СМОЛЕНСК Ц ОТПРАВЛЕНИЕ 10.04.09 13.55
 ВАГОН: 02 ДОКУМЕНТОВ: 006

№ ПП	НОМЕР МЕС-ТА	СТАНЦИЯ ПОСАДКИ	СТАНЦИЯ ВЫСАДКИ	НОМЕР ЗАКАЗА ИЛИ НОМЕР БЛАНКА БИЛЕТА	ТИП ВАГ., КЛ. ОБСЛ	УСЛУГИ	ВИД ДОКУМЕНТА	ДАТА ФОРМ-ЛИ-Н	ПОД-ПИСЬ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ТИП ДОКУМЕНТА ЭЛЕКТРОННЫЙ БИЛЕТ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЙ									
1.	007	МОСКВА БЕЛ	СМОЛЕНСК Ц	70022840006013	П/ЗП	УО	ДЕТСКИЙ	310309	
СР ****1234 ИВАНОВ ИВАН ИВАНОВИЧ									
2.	008	МОСКВА БЕЛ	СМОЛЕНСК Ц	70022840006013	П/ЗП	УО	ПОЛНЫЙ	310309	
ИН 1324354637 ИВАНОВ ИВАН ПЕТРОВИЧ П П К М									
3	011	МОСКВА БЕЛ	СМОЛЕНСК Ц	20101314151617	П/ЗП	УО	ПОЛНЫЙ	310309	
ЗП ****5678 СОЛОВЬЕВ ПЕТР ПЕТРОВИЧ									
4.	021	МОСКВА БЕЛ	СМОЛЕНСК Ц	20101317151619	П/ЗП	УО	ПОЛНЫЙ	310309	
ЗП ****9999 КОРОЛЕВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА									
5.	021	МОСКВА БЕЛ	СМОЛЕНСК Ц	20101317151619	П/ЗП	--	ДЕТС 20	310309	
СР *****3456 ИВАНОВ ИВАН ИВАНОВИЧ ДЕТ									
ТИП ДОКУМЕНТА БЛАНК ЭКСПРЕСС СТРОГОЙ ОТЧЕТНОСТИ									
6	009	МОСКВА БЕЛ	СМОЛЕНСК Ц	АВ123456	П/ЗП	УО	ПОЛНЫЙ	310309	
ИН 1234567890 ПЕТРОВ ИВАН ПЕТРОВИЧ П К									

ВАГОН: 04 ...

ПОДПИСЬ ОТВЕТСТВЕННОГО ЛИЦА _____ РАСШИФРОВКА ПОДПИСИ _____ МП

Рис. 3. Ведомость занятия мест пассажирами в поездах дальнего следования с учетом информации о пассажирах, совершивших противоправные действия

Fig. 3. Sheet on passengers seating in long-distance trains, taking into account information about the passengers who have committed illegal actions

В АРМ «Нарушители» предусмотрена возможность получения за отчетный период (выбор по дате составления протокола) справочно-аналитической информации о количестве и видах совершенных в поездах АО «ФПК» правонарушений с разложением по филиалам формирования поездов и с возможностью сравнения данных с аналогичным периодом прошлого года, а также возможность получения развернутой информации о правонарушителях.

В качестве НСИ АРМ «Нарушители» используются следующие данные [10, 11]: перечень филиалов АО «ФПК»; данные о маршрутах (расписании) движения пассажирских поездов; данные о классификаторе правонарушений; первичные данные о пассажирах, совершивших противоправные действия в поездах АО «ФПК»; первичные данные об административных протоколах, оформленных в поездах АО «ФПК».

Выходными формами АРМ «Нарушители» в подсистеме «Формирование справочно-аналитической информации о правонарушителях» являются:

- справка о правонарушениях по филиалам АО «ФПК»;
- справка о правонарушениях конкретного пассажира;
- справка для сравнения с прошлыми периодами количества правонарушений по филиалам АО «ФПК» с разбивкой по месяцам года.

Формирование выходных справочно-аналитических форм осуществляется с учетом категорий правонарушений за отчетные периоды: день, месяц, период дат в течение месяца, год.

Справка о правонарушениях по филиалам АО «ФПК» содержит информацию о количестве и виде совершенных правонарушений в поездах АО «ФПК» за указанный период. В табл. 1 представлен пример справки о правонарушениях по филиалам АО «ФПК» за август 2015 г. с разложением по филиалам, по поездам и по конкретным правонарушителям.

Справка о правонарушениях конкретного пассажира за отчетный период содержит информацию обо всех правонарушениях, совершенных им за отчетный период, с указанием полной информации о происшествии в пути следования (табл. 2). С целью обеспечения защиты персональных данных в табл. 2 изменены Ф. И. О. пассажира, номер документа, удостоверяющего личность, и номер проездного документа.

Справка для сравнения с прошлыми периодами количества правонарушений по филиалам АО «ФПК» с разбивкой по месяцам года предоставляет информацию обо всех совершенных правонарушениях в целом (или по конкретно выбранному виду правонарушения) за текущий и предыдущий периоды с указанием процента изменения с разбивкой по филиалам АО «ФПК». Данный функционал планируется использовать с 2016 г., так как в АБД АСУ «Экспресс-3» отсутствует информация о пассажирах, совершивших противоправные действия в поездах формирования АО «ФПК» за предыдущие периоды (ранее 2015 г.).

Выводы. 1. На базе АСУ «Экспресс-3» разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию система учета пассажиров, совершивших противоправные действия в поездах формирования АО «ФПК», и предоставления информации для поездных бригад. Программными способами на основе аналитической базы данных «Экспресс-3» реализованы задачи подготовки первичной информации о пассажирах, нарушивших общественный порядок в поездах АО «ФПК»; формирования для поездных бригад информации о проезде в поездах пассажиров, совершивших противоправные действия в течение последних двух лет; формирования и выдачи справочно-аналитической информации о правонарушениях по филиалам формирования поездов.

2. С целью профилактики правонарушений и улучшения качества обслуживания пассажиров на основе нового программного комплекса обеспечивается поддержка принятия решений по бизнес-процессам учета правонарушений в поездах АО «ФПК» и контроля над проездом пассажиров, ранее нарушивших общественный порядок.

Таблица 1

Справка о совершенных правонарушениях в поездах АО «ФПК» за месяц: август 2015 г.

Table 1

Information on wrongdoings committed in trains of JSC «ФПК» for the month: August 2015

Правонарушения			А	Б	В	Д	З	И	К	Н	П	С	Х	Итого
Филиалы	Поезд	ФИО												
ВОСТ-СИБИРСКИЙ						2			1		16		1	20
ГОРЬКОВСКИЙ	0002Й (МОСКВА КАЗ — КАЗАНЬ ПАС)										1			1
	0032Г (МОСКВА ЯР — КИРОВ ПАСС)										4			4
	0059Г (Н. НОВГОРОД М — С-ПЕ-ТЕР-ГЛ)	ШВЕЕВ Я О									1			1
		Итого									1			1
	0088С (АДЛЕР — Н. НОВГОРОД М)										2			2
	0090Г (Н. НОВГОРОД М — ВОРКУТА)										1		1	2
	0133А (С-ПЕТЕР-ГЛ — КАЗАНЬ ПАС)										3			3
	0133Г (КАЗАНЬ ПАС — С-ПЕТЕР-ГЛ)										2			2
	Итого										14		1	15
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ			3						1		6		43	53
ЕНИСЕЙСКИЙ											48			48
ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ						1				7	27			35
ЗАП-СИБИРСКИЙ			1						10	5	50			66
КУЙБЫШЕВСКИЙ											82			82
МОСКОВСКИЙ				3		3					17	1	15	39
ПРИВОЛЖСКИЙ											18		17	35
СЕВЕРНЫЙ			3					1	22		145	2	12	185
СЕВ-ЗАПАДНЫЙ						1	1				25	1	1	29
СЕВ-КАВКАЗСКИЙ						2		1			19		2	24
УРАЛЬСКИЙ					1		1		1	1	79	4		87
ЮГО-ВОСТОЧНЫЙ				1							12			13
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ			3						1		49		1	54
Итого			10	4	1	9	2	2	36	13	607	8	93	785

Таблица 2

Справка о правонарушениях за месяц: август 2015 г.
пассажир ИВАНОВ И. И.

Table 2

Information about illegal action for the month: August 2015
passenger Ivan I. Ivanov

Документ	Коммента-рий	Номер протоко-ла	Дата про-токола	Вид правонаруше-ния	Код право-нарушения	Номер поезда	Маршрут по-езда	Номера вагона	Номер про-ездного до-кумента	Дата от-правления	Станция составле-ния акта
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ПН5555555	АЛКО-ГОЛЬНОЕ ОПЬЯНЕ-НИЕ	1410	21.08.2015	РАСПИТИЕ СПИРТНЫХ НАПИТКОВ И УПОТРЕБЛЕ-НИЕ НАРКО-ТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ	П	0678Я	СЫКТЫВ-КАР — КОСЛАН	015	ДЮ*04262	21.08.2015	МИКУНЬ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климова Е. В. Оценка экономической эффективности способов организации скоростного движения пассажирских поездов: дисс. на соиск. уч. степ. канд. экон. наук. Новосибирск, 2015. 140 с.
2. Савельев М. Ю. Выбор оптимальных параметров системы освоения потоков пассажиров, багажа, грузобагажа на сети железных дорог Российской Федерации: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М., 2015. 170 с.
3. Бынков В. И. О совершенствовании законодательства в сфере обеспечения безопасности в области железнодорожных перевозок // Транспортная безопасность и технологии. 2011. № 2. С. 11–17.
4. Климанская Е. В. Методы эффективной организации хранения слабоструктурированной и нечеткой информации в автоматизированных системах управления на транспорте: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2014. 144 с.
5. Березка М. П., Сунгатуллина А. Т. Имитационное моделирование существующего процесса одновременной обработки запросов пользователей в среде АСУ «Экспресс-3» // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 4. С. 25–29.
6. Сунгатуллина А. Т. Имитационное моделирование одновременной обработки запросов пользователей в среде АСУ «Экспресс-3» с использованием механизма онлайн-сортировки // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 6. С. 61–66.
7. Volchkov D. V. Development the structure of program complex document exchange between enterprise DMS // International Conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications». October 7–10. 2013. Moscow. Technosphaera. 2013. pp. 329–331.

8. Galatenko V. A., Kostyukhin K. A. Increasing the reliability of the hardware and software systems with the controlled execution tools // International Conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» October 7–10. 2013. Moscow. Technosphaera. 2013. pp. 304–309.
9. Березка М. П., Родин И. В. Система «Экспресс-3»: новые технологии обслуживания и реформа пассажирского комплекса: сб. докладов XIV Международной научно-практической конференции «Инфотранс-2009». Санкт-Петербург, 2010. С. 155–160.
10. Макеева Е. З., Махарадзе В. В. Нормативно-справочная информационная система—инструмент управления экономической эффективностью организации // Транспортное дело России. 2014. № 5 (114). С. 34–36.
11. Чеботарев В. В. Логическая нейронная сеть в основе контроля данных о перевозке грузов на железнодорожном транспорте // Информационные технологии. 2014. № 9. С. 74–80.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СУНГАТУЛЛИНА Алина Тальгатовна,
канд. техн. наук, ведущий программист лаборатории
«Программные продукты АСУ «Экспресс», АО «ВНИИЖТ»

ГУМИНА Инна Борисовна,
заведующая лабораторией «Программные продукты АСУ
«Экспресс», АО «ВНИИЖТ»

ДОБЫЧИНА Виктория Анатольевна,
заместитель заведующего лабораторией «Информационные
технологии по обслуживанию пассажиров», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 10.11.2015 г., принята к публикации
11.12.2015 г.

Automated system of passenger accounting, committed illegal actions in trains of JSC “FPK” formation, and provision of information to train crews

A. T. SUNGATULLINA, I. B. GUMINA, V. A. DOBYCHINA

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC “VNIIZHT”), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Article tackles the solution of the problem of wrongdoing prevention in the train of JSC “FPK”, related to the lack of opportunity to provide immediate information to train crew on traveling passengers previously committed illegal actions. For this purpose the developers of ACS “Express-3” have developed the analytical report system that provides business-processes of accounting and controlling the wrongdoing in long-distance trains and solves the following problems:

- prepare initial information on the classification of illegal actions and passengers disturbing public order in the trains of JSC “FPK”;
- form for train crew the information on passengers with previously committing illegal actions in trains of JSC “FPK”;
- form and provide reference and analytical information on the actions to the branches forming trains.

The functional parts of the new software and analytical complex are implemented with the workstation “Disturbers”. The workstation “Disturbers” in the part of “Formation of the classifier of disturbers” allow to input, to correct and to delete the records about illegal actions of passengers in long-distance trains. The qualified staff at the train formation and turnover stations may use workstation in the part of “Enter information about disturbers”. They collect the information sheets from trainmasters and input the information on passenger disturbing public order. Before the departure, trainmasters provide train crew with the information sheets on passengers seating, including passengers proceeded e-registration.

■ E-mail: express@vniizht.ru (A. T. Sungatullina)

Information sheets are completed in the tabular form that breakdown by each car and seat number through the whole train. Nowadays, the information sheets are updated by information about disturbers, generated by using workstation “Disturbers” in the part of “Provision of information about disturbers”. The workstation “Disturbers” main functional feature is the opportunity to obtain analytical information about numbers and kinds of wrongdoings in the trains of JSC “FPK” split by train forming branches for the reporting period, the opportunity of the data comparison with the analogue last year period and also the opportunity to obtain distributor’s detailed information.

Keywords: accounting and control of illegal actions; classifier of illegal actions; reference-analytical reporting on illegal actions

REFERENCES

1. Klimova E. V. *Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti sposobov organizatsii skorostnogo dvizheniya passazhirskikh poezdov*. Kand. ekon. nauk diss. [Assessment of economic efficiency of ways to organize high-speed passenger trains. Cand. econ. sci. diss.]. Novosibirsk, 2015, 140 p.
2. Savel'ev M. Yu. *Vybor optimal'nykh parametrov sistemy osvoeniya potokov passazhirov, bagazha, gruzobagazha na seti zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii*. Kand. tekhn. nauk diss. [Selection of the optimal parameters of exploration system of flow of passengers, baggage, cargo-luggage on the railway network of the Russian Federation. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2015, 170 p.

3. Bynkov V.I. *O sovershenstvovanii zakonodatel'stva v sfere obespecheniya bezopasnosti v oblasti zheleznodorozhnykh perevozok* [On improvement of legislation in the sphere of securing safety in the field of railway transport]. *Transportnaya bezopasnost' i tekhnologii*, 2011, no. 2, pp. 11 – 17.

4. Klimanskaya E.V. *Metody effektivnoy organizatsii khranilishch slabostrukturirovannoy i nechetkoy informatsii v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya na transporte*. Kand. tekhn. nauk diss. [Methods for efficient organization of storages of understructured and indistinct information in automated control systems of transport. Cand. tech. sci. diss.]. Rostov-on-Don, 2014, 144 p.

5. Berezka M. P., Sungatullina A. T. *Imitatsionnoe modelirovanie sushchestvuyushchego protsessa odnovremennoy obrabotki zaprosov pol'zovateley v srede ASU "Ekspress-3"* [Simulation modeling of the existing process of simultaneous processing of user requests in the ACS "Express-3"]. *Vestnik VNIIZHT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2013, no.4, pp. 25 – 29.

6. Sungatullina T. A. *Imitatsionnoe modelirovanie odnovremennoy obrabotki zaprosov pol'zovateley v srede ASU "Ekspress-3" s ispol'zovaniem mekhanizma onlayn-sortirovki* [Simulation modeling of simultaneous processing among ACS "Express-3" user requests using online grading mechanism]. *Vestnik VNIIZHT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2013, no.6, pp. 61 – 66.

7. Volchkov D. V. *Developing the structure of program complex of document exchange between enterprise of DMS, International Conference "Distributed computer and communication networks: control, computation, communications"* (October 2013). Moscow, Technosfera, pp. 329 – 331.

8. Galatenko V. A., Kostyukhin K. A. *Increasing the reliability of hardware and software systems with the controlled execution tools, International Conference "Distributed computer and communication networks: control, computation, communications"* (October 2013). Moscow, Technosfera, pp. 304 – 309.

9. Berezka M. P., Rodin I. V. *Sistema "Ekspress-3": novye tekhnologii obsluzhivaniya i reforma passazhirskogo kompleksa* ["Express-3" system: new service technologies and reform of passenger transport. Proceedings of the XIV International scientific and practical conference "Infotrans 2009". Reports collection]. Saint-Petersburg Publ., 2010, pp. 155 – 160.

10. Makeeva E. Z., Makharadze V. V. *Normativno-spravochnaya informatsionnaya sistema — instrument upravleniya ekonomicheskoy effektivnost'yu organizatsii* [Standard-reference information system — tool for managing the organization of economic efficiency]. *Transportnoe delo Rossii*, 2014, no.5, pp. 34 – 36.

11. Chebotarev V. V. *Logicheskaya neyronnaya set' v osnove kontrolya dannykh o perevozke gruzov na zheleznodorozhnom transporte* [Logic neural network based on data control on transport of goods in railway transport]. *Informatsionnye tekhnologii*, 2014, no. 9, pp. 74 – 80.

ABOUT THE AUTHORS

SUNGATULLINA Alina Tal'gatovna,

Cand. Sci. (Eng.), Leading programmer, Laboratory for Software ACS Express, JSC "VNIIZhT"

GUMINA Inna Borisovna,

Head of Laboratory for Software ACS Express, JSC "VNIIZhT"

DOBYCHINA Victoria Anatol'evna,

Deputy Head of Laboratory for Information technologies for passenger service, JSC "VNIIZhT"

Received 10.11.2015

Accepted 11.12.2015

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Повышение эффективности устройства и содержания железнодорожного пути: сборник трудов ВНИИЖТ / под ред. А. Ю. Абдурашитова. М.: ВМГ-Принт, 2014. 125 с.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований с применением методов математического моделирования по выбору оптимального профиля рельсов из условий минимизации уровня воздействия от колес подвижного состава. Рассмотрены основные показатели безотказности технических средств стрелочного хозяйства с учетом внедрения системы управления ресурсами и рисками (УРРАН). Изложены результаты разработки новой конструкции железобетонной шпалы, предназначенной для различных эксплуатационных условий, включая тяжеловесное и

высокоскоростное движение. Предложены конструкции охранных приспособлений для безбалластного мостового полотна. Приводятся основные положения методики выбора оптимальных технических решений по стабилизации и усилению оседающих насыпей на мерзлоте в условиях БАМа.

Рассмотрены вопросы определения зависимости сопротивления конструкции скреплений внешнему воздействию от их фактического состояния. Представленные в сборнике работы направлены на повышение надежности функционирования конструкции железнодорожного пути в различных эксплуатационных условиях, могут быть полезны инженерно-техническим работникам железнодорожного транспорта, преподавателям и студентам транспортных вузов.

Дыдышко П. И. Земляное полотно железнодорожного пути. Справочник: науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2014. 416 с.

Изложены справочные данные и научное обоснование обеспечения стабильности земляного полотна железнодорожного пути, включая инновационные решения, на основе исследований процессов тепломассопереноса в грунтах. Представлено неизвестное ранее термоэлектрокинетическое явление, обуславливающее перенос влаги в капиллярных анизотермических системах, который влияет на несущую способность и устойчивость основания пути. Материалы справочника включают в себя порядок прове-

дения инженерных изысканий, методы расчетов, конструкции земляного полотна новых линий, дополнительных главных путей и усиления (реконструкции) эксплуатируемых линий. Рассмотрены объекты в различных инженерно-геологических условиях. Приведены порядок содержания земляного полотна, правила приемки объектов в эксплуатацию и правила охраны окружающей среды.

По вопросам предварительного заказа на приобретение книг обращайтесь в редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ», тел. (499) 260-43-20.

УДК 621.332.35.32

Электроэрозия электрических контактов

В. Я. БЕРЕНТ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. В результате нарушения непосредственного взаимодействия между контактами возникают электрические разряды. В результате их воздействия происходит электрическая эрозия контактов. Рассмотрены контакты матричного типа, рекомендации по их составу, характер их повреждаемости. Исследованы разрушения углеродных материалов от дуговых разрядов. Показана более высокая эрозионная стойкость металлоуглеродных вставок перед угольными. Подтверждена положительная роль легкоплавкой фазы в составе контактов каркасного вида при воздействии электрической дуги. Рассмотрены эрозионные повреждения контактов при токоосеме токов высокой плотности.

Ключевые слова: электрическая эрозия; электрическая дуга; контакты матричного вида; контакты каркасного вида; угольные вставки; металлоуглеродные вставки; порошковые контактные пластины; легкоплавкая составляющая композиция контакта

Введение. Контактный провод электрифицированных железных дорог и токосъемные элементы поездов токоприемников работают в атмосферных условиях, часто сопровождающихся нарушением их взаимодействия. При этом между ними возникают электрические разряды, повреждающие их. Электрические разряды, сопровождающиеся возникновением электрических дуг, часто проявляются и при работе коммутационных контактов.

Значительное количество повреждений компонентов сильноточного скользящего контакта и коммутационных контактов электрическими разрядами, неизбежно возникающими при токоосеме даже при плотном контакте, но снятии высоких плотностей токов, послужило основанием для исследований этого процесса, выявления природы происходящих повреждений. Тщательного изучения требуют достаточно сложные процессы, связанные с прохождением тока через контакты, а также процессы, сопровождающие эрозию.

При этом надо учитывать, что эрозия контактов определяется преимущественно термическим действием дуги. Она зависит от выделяющейся на электродах энергии, а следовательно, от количества электричества, протекающего в дуге. Эрозия возрастает линейно с током. Условия зажигания и гашения электрических дуг определяются их характеристиками для каждого материала контактов, так как для каждого из

металлов существуют определенные минимальные значения напряжения и тока возникновения дуги.

Воздействие электрических дуг на контакты выявило три механизма их разрушения при электроэрозии. Это испарение, разбрызгивание расплавленного металла и химические процессы, связанные с взаимодействием материала контактов с элементами окружающей среды, и разрушение образовавшихся пленок при термическом воздействии.

Чтобы обоснованно выбрать материалы для скользящих и коммутационных контактов, требуется проанализировать исследования в этой области, изучить и оценить эксплуатационные повреждения и отказы существующих материалов, исследовать явления, происходящие в материале контактов при воздействии электрических разрядов и прохождении электрического тока.

Виды электрических контактов, их состав и структурное построение, связанное со снижением их электроэрозии. Практика использования различных материалов для электрических контактов показала, что по своему построению они могут быть каркасного или матричного типа.

Однородные сплавы на базе твердых растворов в контактах применяются реже, чем многофазные композиционные материалы.

При создании материалов для контактов с гомогенной структурой авторы работы [1] рекомендуют легировать металлическую основу контактов компонентами, снижающими температуру кипения сплава. Более интенсивное испарение компонента, имеющего более низкую температуру кипения (например, Zn в Cu), как показано в работе [2], приводит к обогащению контактной поверхности элементом, имеющим более низкую температуру кипения. Снижение эрозии при этом объясняется уменьшением теплового потока к поверхности контактов от возрастания потерь тепловой энергии на испарение [3].

Положительное влияние легколетучих составляющих на снижение электрической эрозии подтверждается исследованиями [4], в которых считается, что желателен такой материал катода, в котором имелись бы низкикипящие компоненты, но и чтобы теплота испарения их была достаточно высокой.

Так как эрозия происходит преимущественно за счет распыления частиц твердого материала

■ E-mail: val.berent@yandex.ru (В. А. Берент)



Рис. 1. Рельефная структура углеродного материала в донной части кратера после воздействия электрической дуги
Fig. 1. Relief structure of the carbon material in the bottom part of the crater after exposure to the electrical arc

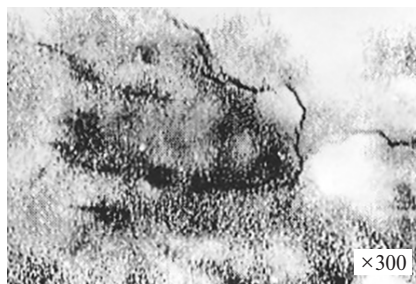


Рис. 2. Оплавленный характер боковых поверхностей кратера углеродного материала
Fig. 2. Melted nature of side surfaces of the carbon material of the crater



Рис. 3. Полые сферические выделения углеродного материала, часто лопнувшие по краям лунки кратера от воздействия дуги
Fig. 3. Hollow spherical extractions of carbon material, often burst at the edges of the crater holes due to the arc exposure

(испарение, разбрызгивание), то она уменьшается с увеличением твердости металла контактов и температуры его плавления и кипения, а следовательно, определяется только прочностью связи между частицами в нем [5].

Прочностные характеристики сплавов как при комнатной, так и при более высокой температуре определяются прочностью межатомных связей в кристаллической решетке. Величина модуля упругости характеризует прочность межатомного взаимодействия, а чтобы повысить модуль упругости, необходимо провести легирование металла контакта [6]. При разработке токоъемных элементов матричного типа следовали этому направлению, упрочняя медную основу контакта легированием.

Упрочнение и повышение термостойкости медной матрицы контакта осуществляли не только созданием твердых растворов, но и методом дисперсионного упрочнения меди [7]. Все электротехнические сплавы с электропроводностью 65–85% электропроводности меди в виде твердых растворов и сплавов меди, подвергающиеся дисперсионному твердению, способны быть устойчивыми к процессу рекристаллизации при нагреве до температур 400–560 °С. Дисперсное упрочнение меди позволяет обеспечить повышение температуры рекристаллизации до 820–850 °С при сохранении электропроводности 90–92% электропроводности меди.

Всеми исследователями эрозии отмечается различие в износе и повреждаемости композиционных и однородных, гомогенных материалов контактов [8, 9, 10]. Несовместимое сочетание свойств у материалов контактов достигается при многофазном их исполнении посредством использования технологии порошковой металлургии при их изготовлении. Гетерогенная структура таких материалов, представляющая собой смесь отдельных фаз с различными свойствами, позволяет на основе аддитивности получить композит с набором противоречивых свойств [8, 11, 12, 13].

Для сильнотоочных контактов применяют тугоплавкую матрицу — каркас, а для придания ей необходимых электрических и теплопроводных свойств в ней размещают менее тугоплавкую фазу с соответствующими свойствами. В данном случае проявляется положительная роль гетерогенной структуры композиционных материалов, так как в опорной точке дуги потери тепловой энергии происходят от нагрева, плавления, кипения и испарения легкоплавкой фазы, а тугоплавкий каркас затрудняет выброс жидкой фазы [14], удерживая ее в порах силами поверхностного натяжения [8]. Тугоплавкая матрица при этом сохраняется и мало теряет свою прочность благодаря поглощению тепла за счет испарения более легкоплавкого компонента. От самых разогретых фаз композита происходит отвод тепла к компонентам с большей теплопроводностью, которые и являются более легкоплавкими. В результате происходит рассредоточение тепловых потоков, исходящих из опорной точки дуги. От тепловой энергии дуги на композиционных материалах не образуются макроразливы расплавленного металла из-за сохранности тугоплавкого каркаса, а на однофазном металле образуется сплошная ванна, из которой происходит выброс капель металла.

Рекомендации по созданию материала с углеродной матрицей для контактных вставок на основе исследований их повреждаемости при дуговых разрядах. Учитывая приведенные закономерности поведения материалов контактов при воздействии на них электрических разрядов, проводились разработка материалов токоъемных элементов полозов токоприемников и исследование процессов, сопровождающих их эрозию.

При разработке углеродного материала для токоъемных элементов уделялось внимание процессам, протекающим в них при действии электрических дуг. Для этого проводились исследования повреждаемости и структурных изменений углеродных материалов в различных частях кратера, образовавшегося в опорной точке электрической дуги. По состоянию углеродных материалов на различных участках

поверхности кратера можно судить о процессах, протекающих в них. Установлено три вида состояния поверхности кратера с совершенно различными структурами, каждая из которых связана с особенностью процессов, происходящих на его поверхности.

В донной части кратера обнаруживается мелко-рельефная структура, образующаяся в результате выгорания более летучих компонентов, связующих, обожженных углеродных материалов. Чешуйчатая структура углеродных материалов в донной части кратера обусловлена высокой температурой электрической дуги ($3000–5000^{\circ}\text{C}$), вызывающей их сублимацию (2100°C при давлении 1 кгс/см^2), и отсутствием воздушных потоков в этой части поражения материала дугой (рис. 1).

Боковые поверхности кратера имеют совершенно другую структуру: они более гладкие, поверхность их носит оплавленный характер (температура плавления углерода 3500°C при давлении 100 кгс/см^2), что связано с потоками разогретых газов, вырывающихся из кратера (рис. 2).

Краевые участки кратера, не подверженные воздействию газовых потоков и в то же время находящиеся под влиянием высоких температур (у поверхности на угловом участке теплоотвод затруднен), покрыты полыми сферическими выделениями углеродного материала, часто лопнувшими (рис. 3). Вблизи вырывающихся струй газов и паров из кратера в зоне разряжения беспрепятственно при высоких температурах может происходить формирование шарообразных полых королек углерода, выдуваемых газами, выделяющимися из материала. На корольках выделяется также сублимированный в кратере углерод. Подтверждением сказанного выше является выделение королек в трещинах, где отсутствуют потоки струй паров и газов.

Проведенные исследования позволили наметить пути по снижению разрушающего действия электрических разрядов. Так, осуществление направленного теплоотвода от опорной точки дуги позволило бы уменьшить разрушение материала от ее тепловой

энергии. При этом разрушающее действие дуги в значительной степени определяется как теплопроводностью самого материала, так и его пористостью, так как воздух пор препятствует теплоотводу. В связи с этим проводились исследования теплоемкости и теплопроводности углеродных материалов различной природы на автоматическом сканирующем калориметре КСИТ-1300. В калориметре использовался метод плоского теплового источника в стационарном и динамическом тепловом режиме. Теплопроводность углеродных материалов токосъемных вставок марки О, А, Б определялась в сравнении с металлоуглеродными вставками фирм Schunk, Ringsdorf, Morganite и материалом щеточного графита марки ЭГ. Кроме того, у этих материалов в интервале температур от 20 до 1000°C определялось относительное удлинение и термический коэффициент линейного расширения.

Металлоуглеродные вставки зарубежного производства выполнены по условиям создания контактов каркасного типа. Полые пространства каркаса из более термостойкого углерода заполнены более легкоплавкой медью или ее сплавами. Такое структурное построение контакта уменьшает его эрозионное повреждение, что подтверждается его физическими показателями. Если у вставки марки А на коксовой основе с удельным электрическим сопротивлением $30\text{ мОм}\cdot\text{м}$ теплопроводность при 1000°C составляет 25 Вт/м^2 , теплоемкость $1,75\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, относительное удлинение $0,365\%$, термический коэффициент линейного расширения $\alpha 3,8\cdot 10^{-6}\text{ 1/K}$, а у металлографитовых вставок соответственно 32 Вт/м^2 , $1,9\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, $0,45\%$; $\alpha 4,8\cdot 10^{-6}\text{ 1/K}$, то это убедительно подтверждает преимущество последних токосъемных элементов в стойкости к повреждениям электрических разрядов. Это происходит благодаря лучшей теплопроводности и более высокой пластичности матрицы металлоуглеродных вставок, а также из-за того, что при воздействии дуги более теплопроводная фаза композита — медь привлекает и расходует тепловую энергию на плавление, кипение и испарение, сохраняя при этом от повреждения углеродный каркас композита.

По своим физическим характеристикам угольные вставки марки Б, изготовленные из искусственного графита с удельным электросопротивлением $15\text{ мОм}\cdot\text{м}$, превосходят коксовую основу вставок марки А. Это наглядно проявляется в интенсивности повреждения их материалов от воздействия дуги одинаковой мощности (рис. 4, а, б, в).

Если места, пораженные дугой на угольных вставках марок А и Б, повреждены трещинами, то у металлоуглеродных вставок они не образуются. Исследования на растровом микроскопе JEOL JXA-50A показали, что в донной части небольшого кратера меди осталось мало, но зато она в большей степени разместила по краям кратера. В этом месте происходит

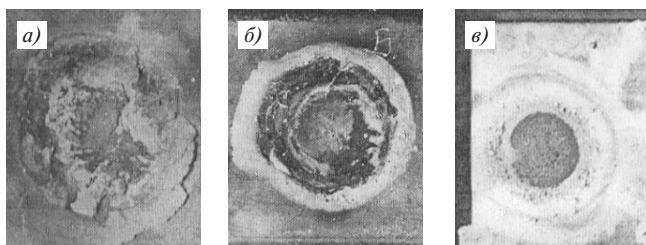


Рис. 4. Повреждение поверхности угольных вставок марок А и Б термическими трещинами у кратера от воздействия дуги одинаковой мощности (а и б соответственно) и отсутствие трещин у кратера металлоуглеродной вставки (в) ($\times 1,5$)

Fig. 4. Damage of surface of the carbon inserts of grades А and В by thermal cracks at the crater due to the arc action of the same power of (а and б, respectively) and the absence of cracks in the crater of metal insert (в) ($\times 1,5$)

вытеснение, выпотевание меди на поверхность. В ряде случаев из-за вытеснения расплава меди газами образуются сферические полые частицы. На периферии от кратера медь из паров выделяется в виде губчатых образований (рис. 5).

Установленные явления при повреждении различных углеродных материалов электрической дугой позволяют объяснить их устойчивость к электроэрозии или наибольшую их повреждаемость, что было продемонстрировано испытаниями на эрозионную стойкость (рис. 6). Ввод меди в виде порошка в углеродную шихту вставок марки А и Б мало эффективен из-за разобщенности частиц меди в углеродной матрице. В металлоуглеродных вставках зарубежных фирм располагаются взаимосвязанные каналы проводимости из меди или из ее сплавов из-за пропитки углеродной матрицы металлом.

При исследовании пористости, влияющей на теплопроводность контактов, было установлено, что у различных углеродных материалов наблюдается различное статистическое распределение размеров пор. Испытаниями на эрозионную стойкость под воздействием электрических дуг было установлено, что такие углеродные материалы, как ЭГ-141 и ЭГ-75 с мономодальным распределением открытых пор и обладающим их радиусом от 0,1 до 0,7 мкм, обладают высокой эрозионной стойкостью из-за того, что опорная точка дуги на их поверхности все время перемещается. Материалы марок ЭГ-74, ЭГ-841, Е33 обладают полимодальным распределением пор радиусом от 0,01 до 3,5 мкм и имеют самую низкую эрозионную стойкость (в 6–8 раз), так как кратеры от дуг на их поверхности образуются большие с разрыхленной поверхностью, как у вставок марок А и Б. Углеродные материалы с бимодальным распределением открытых пор по критериям дугостойкости занимают промежуточное положение. Эти исследования позволили подойти к более рациональному выбору углеродного материала для вставок полозов.

Результаты исследований были подтверждены эксплуатационными испытаниями. Зимние испытания в период дугового токосъема зарубежных металлоуглеродных вставок показали, что на 15 электровазонах ЧС2^Т, обращающихся на участке постоянного тока Мурманск — Лоухи, за месяц по предельному износу было заменено 32 полоза с угольными вставками марки Б и 2 из-за разрушения вставок. По предельному износу заменено 7 полозов с металлоуглеродными вставками. Износ вставок марки Б в период жесткого дугового токосъема составил 16,5 мм на 10³ км, а металлоуглеродных вставок — 8 мм на 10³ км пробега токоприемника.

Аналогичные результаты свойств углеродных вставок были получены европейскими исследователями. Если износ угольных и металлоуглеродных вставок

Рис. 5. Выделение меди в виде полых сферических частиц и губчатых образований при конденсации ее паров по краям лунки кратера (×300)

Fig. 5. Extraction of copper in the form of hollow spherical particles and spongy formations at its vapor condensing on the edges of the crater hole (×300)

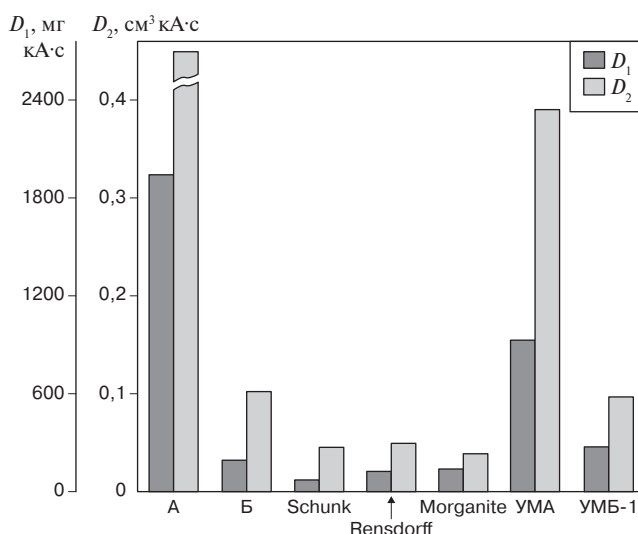
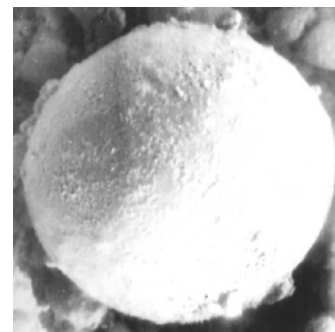


Рис. 6. Электроэрозия токосъемных элементов полозов токоприемников, не содержащих и содержащих в углеродном материале медь:

D_1 — весовая потеря контакта; D_2 — объемная потеря материала; УМА и УМБ-1 — вставки марок А и Б с вводом медного порошка через шихту

Fig. 6. Electroerosion of current collector elements of current collector strips, containing or not containing any copper in carbon material: D_1 — weight loss of contact; D_2 — volume material loss; UMA and UMB-1 — insertion of grades A and B with copper powder entering through the charge

при бездуговом токосъеме одинаков и составляет 1 мм³/км, то при увеличении интенсивности дугообразования на 1,2% износ угольных вставок увеличивается до 4,15, а металлоуглеродных вставок — в меньшей степени, до 2,65 мм³/км. В том случае, когда длительность воздействия дуги возрастает на 1,2%, износ угольных вставок увеличивается до 4,5, а металлоуглеродных — до 2,7 мм³/км [15].

Роль легкоплавкой фазы в построении контактов каркасного вида при создании порошковых контактных пластин на металлической основе. Принципы создания композиционных контактов каркасного типа были подтверждены при создании токосъемных элементов полозов из порошковых материалов на железной основе. При этом в каркасе из железа размещалась более легкоплавкая медная составляющая. Испытаниями на дугостойкость определялся вклад более

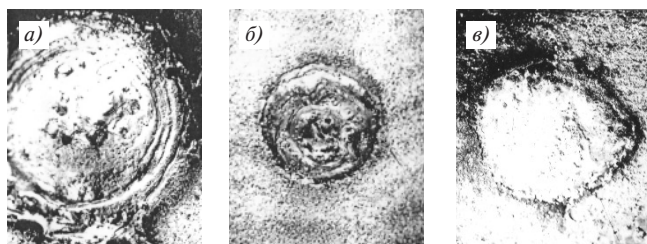


Рис. 7. Участки поверхности порошковых материалов на основе железа с 5% меди (а) и 20% меди (б), а также с 15% меди и 22% сплава Pb—5% Sn, состав марки ВЖЗП (в) при повреждении их электрической дугой одинаковой мощности ($\times 7,5$)

Fig. 7. Surface areas of powder materials on the basis of iron with 5% copper (a) and 20% copper (b), and 15% copper and 22% alloy Pb—5% Sn, the composition of VZH3P mark (c) in case of damage of them by the electric arc of the same power ($\times 7,5$)

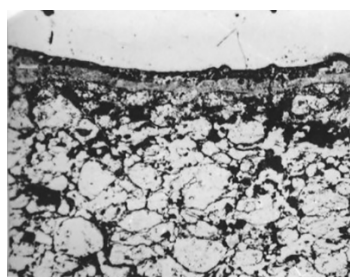


Рис. 8. Микроструктура порошкового материала пластины марки ВЖЗП в донной части кратера при воздействии дуги большой мощности ($\times 200$)

Fig. 8. The microstructure of the powder material of the plate of VZH3P mark in the bottom part of the crater at high power arc exposure ($\times 200$)

легкоплавких фаз в тугоплавкой матрице в уменьшение эрозионных повреждений композита. Проводилось сравнение кратеров после воздействия электрических дуг при силе тока 650 А, напряжении 17 В и размыкании под током 1 с. Наиболее сильно подвержены электроэрозии порошковые композиты с 5% меди, так как в них отсутствует структурно свободная медь из-за полной ее растворимости в железе. Включения меди появляются в железной матрице при ее количестве в композите более 8–10%. На рис. 7, а, б, в видно значительное снижение повреждения контакта при содержании в железе 20% меди.

Так как антифрикционные свойства порошковый композит Fe—Cu приобретает после ввода в него легкоплавкого сплава Pb—5% Sn, то это в большей степени оказывает влияние на снижение эрозионных повреждений. При увеличении в композите количества легкоплавкой составляющей (меди на 15–20%; 16–25% сплава CO5 Pb—5% Sn) эндотермический эффект обеспечивает более интенсивный отвод тепла и снижение электроэрозии. На материале контактных пластин марки ВЖЗП на железной основе с 15% Cu и 22% сплава CO5 разрушение от воздействия дуги небольшое. Ожог представляет собой круглый кратер площадью 3,14 мм² с малой глубиной (см. рис. 7).

В случае воздействия значительных по интенсивности дуг (600 А; время 2 с) донная часть кратера оплавляется с образованием сплавов железа и меди (рис. 8). Вблизи краев кратера образуются капли

выплавившегося свинца из пор железного каркаса композита.

Способность материалов контактов вызывать или снижать появление электрических разрядов. Физические характеристики материалов и их константы (температура плавления, испарения) оказывают влияние на образование электрических разрядов. Они влияют на величину их эрозии в связи со способствующими или затрудняющими условиями образования и поддержания электрического разряда. Рассматривая природу возникновения электрических разрядов, необходимо учитывать, что их образование определяется степенью ионизации воздушных промежутков между контактами, а время их действия при увеличении расстояния между контактами — способностью материалов поддерживать эту ионизацию.

По длительности действия электрических разрядов проводилась оценка способности конкретного материала токосъемного элемента ионизировать воздушный промежуток, насыщать его электронами и ионами при одинаковом токе и напряжении дуги в паре с медным контактным проводом. Было установлено, что ввод в порошковые металлические материалы контактов легкоплавких сплавов позволяет снизить время действия электрического разряда. Это, очевидно, связано с испарением легкоплавкой фазы композита, появлением между контактами ее паров и повышением давления между ними с «выдуванием» — нарушением целостности цепи, проводящей ток через воздушный промежуток. Наибольшая длительность действия электрического разряда проявлялась особенно при токах 15 и 25 А, используемых при эксперименте, у токосъемных элементов матричного типа на медной основе.

Из всех неметаллизированных углеродных токосъемных элементов наибольшую длительность действия электрических разрядов вызывает угольная вставка марки А, имеющая коксовую основу и углеродный материал Ag-1500. У металлоуглеродных вставок наблюдается увеличение времени действия электрических разрядов, а при отсутствии металла в угле, наоборот, уменьшение времени их действия. Из-за значительно более низкой, чем у металлов, теплопроводности углеродной основы токосъемных элементов происходит сильный перегрев ее в опорной точке электрической дуги, что приводит к настолько сильному перегреву паров легкоплавкой фазы, что атомы металла ионизируют и способствуют переносу электрических зарядов через воздушный промежуток.

Эрозия электрических контактов в местах токосъема токов высокой плотности. Проводились исследования интенсивной эрозии материалов контактов в условиях их плотного касания друг с другом. На рис. 9 представлено эрозионное повреждение, наблюдаемое

в эксплуатации, в виде желоба по всей ширине контактной пластины из порошкового материала на железной основе. В результате интенсивного местного нагрева при снятии тока большой плотности происходит оплавление и испарение объемов металла в точках контакта токосъемного элемента с контактным проводом (рис. 9).

С нагревом участков контакта при прохождении тока истинная площадь их взаимодействия увеличивается и переходное электросопротивление R_k уменьшается. Сравнение R_k в различные промежутки времени показало, что достижение высоких температур в контакте и формирование проводящих участков происходят за миллисекунды и завершаются в первом полупериоде переменного тока частотой 50 Гц (10 мс). Поэтому зависимости $R_k = f(I)$ построены (см. рис. 10,

Рис. 9. Прожог в виде желоба по всей ширине контактной порошковой пластины из-за высокой плотности тока ($\times 1,0$)

Fig. 9. Burn-through in the form of gutter over the entire width of the powder contact plate due to high current density ($\times 1,0$)



а, б) для в основном сформировавшегося контакта (за 0,07 с) и сложившегося контакта (за 1,5 с протекания тока). Механизм формирования контакта при прохождении тока через контактный провод на токосъемный элемент косвенно определялся по искажениям синусоид тока I и напряжения U в различные моменты времени. Синусоиды строились процессором

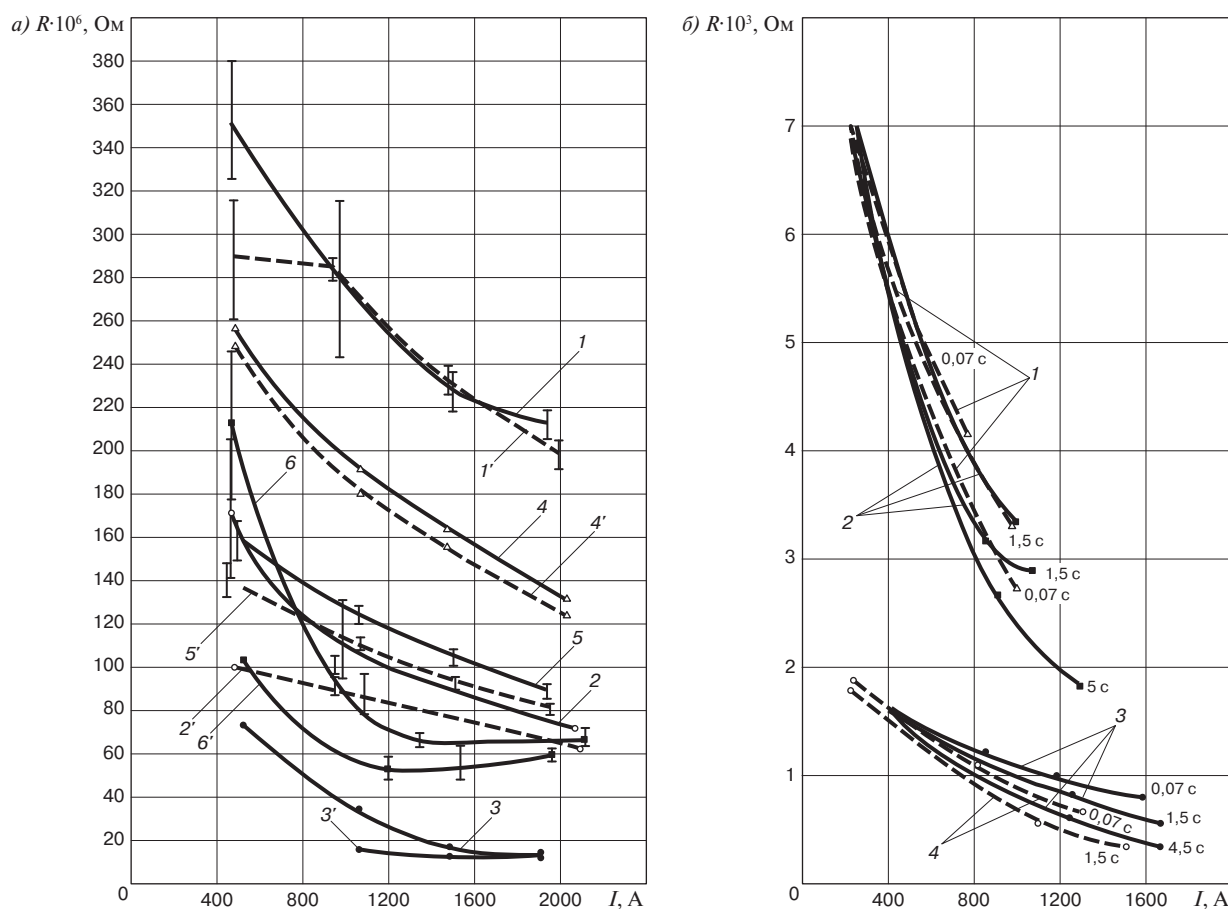


Рис. 10. Изменения переходного сопротивления медного контактного провода МФ-100 с различными токосъемными элементами в зависимости от величины снимаемого тока и времени его протекания:

а) — 1, 2, 3 — порошковые материалы на железной основе с содержанием легкоплавкой фазы 0; 14–18 и более 20,5 соответственно; 4, 5 — порошковые материалы на медной основе с содержанием неметаллической твердой смазки 10–12 и 3%; 6 — монолитная медь; 1, 2, 3, 4, 5, 6 — в начальный период прохождения тока; 1', 2', 3', 4', 5', 6' — в конечный период прохождения тока; б) — при прохождении тока 0,07; 1,5; 4,5; 5 с; 1 — вставка марки А; 2 — вставка марки Б; 3, 4 — вставка металлоуглеродная соответственно фирм Morganite и Ringsdorf

Fig. 10. Changes in transitional resistance of the copper contact wire MF-100 with various current collecting elements depending on the value of collecting current and the period it flows:

а) — 1, 2, 3 — powder materials based on iron containing low-melting phase 0, 14–18 and more 20.5 respectively; 4, 5 — powdered copper-based material containing non-metallic solid lubricant, 10–12 and 3%; 6 — monolithic copper; 1, 2, 3, 4, 5, 6 — in the initial period of current flow; 1', 2', 3', 4', 5', 6' — in the final period of current flow; б) — when current flows 0.07, 1.5; 4.5; 5 seconds; 1 — insert of A grade; 2 — insert of B grade; 3, 4 — metallocarbonic insert of Morganite and Ringsdorf respectively

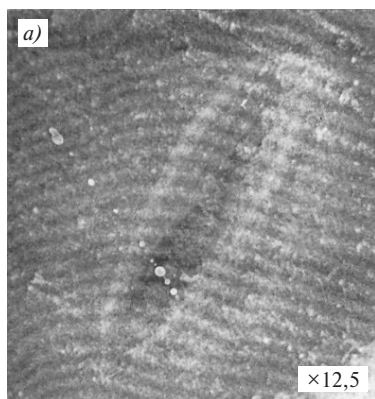
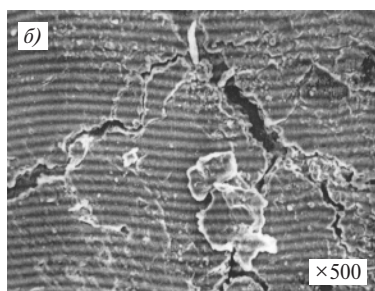


Рис. 11. Поверхность контактной пластины из порошкового материала состава 15% Cu, остальное Fe с повреждениями в месте контакта с проводом при токосъеме 1948 А в течение 4,25 с (а), при токосъеме 8 с появляются термические трещины (б)

Fig. 11. The surface of the contact plate from powder material composition 15% Cu, the rest is Fe with damages in contact point with the wire at current collecting 1948 A for 4.25 s (a), at current collecting for 8 s thermal cracks appear (b)



SF-920 для самого начального момента прохождения тока через контакт и по истечении некоторого времени.

В контактах медный провод — порошковые токосъемные элементы на основе железа с пропиткой легкоплавким сплавом в точках контакта происходит выпотевание легкоплавкой структурной составляющей. По участкам легкоплавкой фазы проходит электрический ток. В первый момент протекания тока происходит изменение мгновенных значений I и U из-за неустановившегося количества легкоплавкой

составляющей в пятнах проводимости в результате ее разбрызгивания и испарения от высокой плотности тока. После снижения плотности тока I благодаря повышению количества легкоплавкой фазы, а следовательно, повышению величины истинного контакта по истечении времени полупериода (10 мс) происходит снижение U и его стабилизация.

Роль легкоплавкой структурной составляющей просматривается и при взаимодействии контактов медь — металлоуглеродный материал вставок. В первый момент на контакте медного провода с металлоуглеродной вставкой образуется пятно проводимости в месте выхода на поверхность при расплавлении металлической фазы из углеродной основы вставки, но из-за высокой плотности тока происходит расплавление, разбрызгивание и испарение металла. В этот момент мгновенные значения I и U претерпевают изменения. Затем осуществляется контакт медь провода — углеродная матрица металлоуглеродной вставки, и U увеличивается. По истечении 20–30 мс при выделении тепловой энергии в контакте в зону его поступает легкоплавкая фаза, и в таких количествах, что обеспечивается металлический контакт со стабилизацией значений I и U ($U = f(t)$, $I = f(t)$ без изменений).

Такой механизм образования пятен контакта проводимости подтверждается одинаковым характером изменения зависимостей $R_k - I$ для контактов металл — металл с легкоплавкой фазой и контактов металл — металлоуглеродный материал (рис. 10, а, б). Величины R_k имеют наибольшие значения для порошковых материалов на железной основе без легкоплавкой фазы, а ввод в этот же материал легкоплавкой структурной составляющей снижает R_k в 4–11 раз.

После взаимодействия медного контактного провода с токосъемными элементами со снятием различных по величине токов оценивалась их повреждаемость. Условия исследований ужесточались увеличением времени прохождения тока через контакты в пределах 0,75–4,5 с. Анализ происходящих на контактных поверхностях токосъемных элементов процессов и состояний их материалов позволил установить для них предельные токи, оценить правильность подхода к их созданию. В результате исследований было установлено, что при снятии токов 1085, 1110, 1538 и 1990 А и времени их прохождения не более 4,5 с на порошковых пластинах состава 15% меди, остальное железо без пропитки легкоплавким сплавом оплавления и термических трещин не наблюдается. При увеличении времени токосъема до 8 с такие повреждения появляются (рис. 11, а, б).

Характер повреждаемости совсем другой у порошкового материала такого же состава, но пропитанного легкоплавким сплавом. В этом случае построение материала контактной пластины полностью отвечает

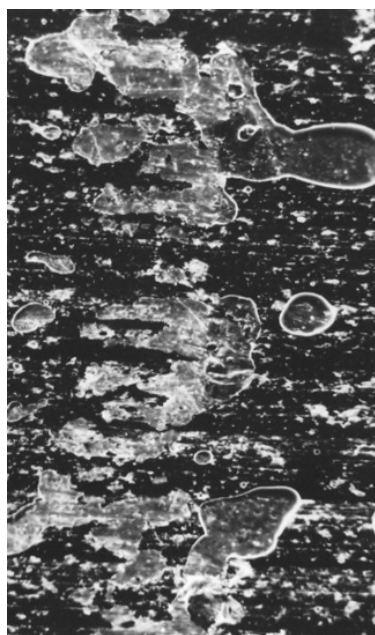


Рис. 12. Поверхность контактной пластины из порошкового материала состава 15% Cu; 22% Pb—5% Sn, остальное Fe без повреждений матрицы, но с выпотеванием легкоплавкого сплава (×20)

Fig. 12. The surface of the contact plate from powder material composition of 15% Cu; 22% Pb—5% Sn, remainder Fe without matrix damage, but with exudation of fusible alloy (×20)

принципам построения контактов каркасного типа. На контактной поверхности нет оплавлений матричного материала, нет и термических трещин, но наблюдается выпотевание легкоплавкого сплава при токосъеме тока 1973 А в течение 8 с (рис. 12).

У металлоуглеродных вставок, построенных по принципу контактов матричного типа, при токах выше 1700 А и времени их прохождения от 0,7 до 3 с на поверхности контакта с проводом появляются капли меди и истинная площадь контактирования увеличивается. Термические трещины на металлоуглеродных вставках отсутствуют даже при более высоких токах и большем времени токосъема. На угольных вставках марки А термические трещины были обнаружены при токе 870 А и времени токосъема 4 с.

Эрозия контактного провода при дуговом токосъеме. Что касается контактного провода, то его эрозийные повреждения при воздействии дуговых разрядов сводятся к расплавлению меди на контактной поверхности с образованием литой столбчатой структуры, пораженной большим количеством газовых раковин. От поверхности за литой зоной располагается зона металла, прошедшего процесс рекристаллизации обработки от тепловой энергии, выделившейся при расплавлении меди (рис. 13). Такой вид повреждения снижает прочность контактного провода и его износостойкость.

При использовании для токосъема угольных вставок на электровазонах постоянного тока износ контактного провода увеличивается из-за электроэрозийных процессов и составляет от 0,3 до 0,9 мм² на 10⁴ проходов токоприемников, в то время как на переменном токе при малых его величинах износ провода на тот же измеритель составляет 0,133 мм².

Выводы. 1. Построение контактов каркасного типа с углеродной матрицей сводится к вводу в нее легкоплавкой фазы в виде меди или ее сплавов по технологии пропитки.

2. Построение контактов каркасного типа на металлической основе осуществляется вводом в каркас из более тугоплавкого металла легкоплавкого металла через шихту порошкового композита или по технологии пропитки уже спеченного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсеевич О.И., Некрашевич И.Г. О селективности в явлении эмиссии вещества из твердых бинарных сплавов при импульсных разрядах в воздухе // Электрические контакты: сб. М.: Энергия, 1964. С. 36–41.
2. Афанасьев М.В., Головейко А.Г. Влияние процентного содержания компонентов на электрическую эрозию бинарных сплавов // Электрические контакты: сб. М.: Энергия, 1964. С. 193–196.
3. Белкин Г.С., Киселев В.Я. Влияние легколетучих составляющих в контактном материале на электрическую эрозию кон-

Рис. 13. Микроструктура у контактной поверхности контактного провода после дугового токосъема (×500)

Fig. 13. The microstructure in contact surface of the contact wires after the arc current collection (×500)



тактов в вакууме // Электротехническая промышленность: сб. М.: Госэнергоиздат, 1978. Т. 1. С. 42–88.

4. Золотых Б.Н. О природе передачи энергии электродам в импульсном разряде при малых промежутках // Электрические контакты. Труды совещания: сб. М.: Энергия, 1964. С. 42–88.

5. Усов В.В., Займовский А.С. Проводниковые, реостатные и контактные материалы. М.: Госэнергоиздат, 1957. 184 с.

6. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов. М.: Металлургия, 1973. 325 с.

7. Берент В.Я., Гнездилов С.А., Шалунов Е.П. Обеспечение надежного токосъема с повышением веса поездов и скорости их движения на электрифицированных железных дорогах // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 6. С. 49–53.

8. Альтман А.Б., Быстрова Э.С. К вопросу о структуре износостойчивых электрических контактов // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 214–223.

9. Францевич И.Н. Материалы электрических контактов // Лекции Всесоюзной школы по электрическим контактам и электродам: сб. Ч. 1 / АН УССР ИПМ. Киев, 1969. С. 120–124.

10. Теодорович О.К., Дьяченко М.Е., Кацапуха С.А. Композиционные электроконтактные материалы и экономическая эффективность их применения. Киев: Укр. НИИНИТИ, 1973. 135 с.

11. Альтман А.Б., Мелашенко И.П., Быстрова И.С. Современные электрокерамические контакты // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1956. С. 171–185.

12. Мелашенко И.П. Материалы для электрических коммутирующих контактов. — В кн.: Справочник по электротехническим материалам. М.: Т.З.Л. Энергия, 1976. С. 473–499.

13. Францевич И.Н., Теодорович О.К. Металлокерамические контакты // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 186–199.

14. Белкин Г.С., Данилов И.М. Исследование особенности электрической эрозии металлокерамических материалов // Электричество. 1972. № 8. С. 63–66.

15. Износ материала контактных вставок токоприемников // Железные дороги мира. 2013. № 10. С. 50–56.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕРЕНТ Валентин Янович,
д-р техн. наук, научный консультант, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 28.07.2015 г., актуализирована 23.09.2015 г., принята к публикации 15.10.2015 г.

Electroerosion of electric contacts

V. Ya. BERENT

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Contact wire of electrified railways and current collecting elements of strips of current collectors are working under atmospheric conditions, often causing failure of its interaction. Electrical discharges occur as a result of failure of the direct interaction between the contacts. Erosion of electric contacts occurs as a result of such discharges. Matrix type contacts, recommendations on its composition as well as nature of its damageability were considered. Destructures of carbon materials by arc discharge were investigated. Higher erosion resistance to metal-carbon inserts is shown. Positive role of low-melting phase in composition of frame-type contacts under the influence of an electric arc are confirmed. The erosion damages to the contacts during current collecting of high-density currents were considered. It is concluded that the construction of the contacts of frame type with a carbon matrix comes down to putting into it low-melting phase in the form of copper or its alloys by impregnation technology. Creation of contacts of frame type on a metal basis is carried out by input fusible metal into a framework of more high-melting metal through a charge of a powder composite or by technology of impregnation of already sintered material.

Keywords: electric erosion; electric arc; contacts of matrix type; arc of matrix type; contacts of frame type; coal inserts; metal-carbon inserts; powder contact plates; high-melting component of contact composite

REFERENCES

1. Avseevich O.I., Nekrashevich I.G. *O selektivnosti v yavlenii emissii veshchestva iz tverdykh binarnykh spлавov pri impul'snykh razryadakh v vozdukh* [On the selectivity in the phenomenon of emission of substance from a solid binary alloys in pulsed discharges in air. Electric contacts. Collection]. Moscow, Energia Publ., 1964, pp. 36–41.
2. Afanas'ev M. V., Goloveyko A.G. *Vliyaniye protsentnogo soderzhaniya komponentov na elektricheskuyu eroziyu binarnykh spлавov* [The impact of the percentage of components on electric erosion of binary alloys. Electric contacts. Collection]. Moscow, Energia Publ., 1964, pp. 193–196.
3. Belkin G.S., Kiselev V. Ya. *Vliyaniye legkoletuchikh sostavlyayushchikh v kontaktnom materiale na elektricheskuyu eroziyu kontaktov v vakuum* [Impact of volatile components in the contact material on electric contact erosion in vacuum], *Elektrotehnicheskaya promyshlennost'*. Electrical industry. Collection]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1978, vol. 1, pp. 42–88.
4. Zolotikh B.N. *O prirode peredachi energii elektrodam v impul'snom razryade pri mal'nykh promezhutkakh* [On the nature of energy transfer of the electrodes in a pulsed discharge at small intervals. Electric contacts. Meeting proceedings collection]. Moscow, Energia Publ., 1964, pp. 42–88.
5. Usov V.V., Zaymovskiy A.S. *Provodnikovyye, reostatnye i kontaktные материалы* [Conductor, rheostat and contact materials]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1957, 184 p.
6. Rosenberg V.M. *Osnovy zharoprochnosti metallicheskiykh materialov* [Fundamentals of heat resistance of metal materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973, 325 p.
7. Berent V. Ya., Gnezdilov S.A., Shalunov E.P. *Obespecheniye nadezhnogo tokos'ema s povysheniem vesa poezdov i skorosti ikh dvizheniya na elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorogakh* [Providing a reliable current collection with an increase in weight of trains and their speed on electrified railways]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2011, no. 6, pp. 49–53.
8. Altman A.B., Bystrova E.S. *K voprosu o strukture iznosous-toychivyykh elektricheskikh kontaktov* [On the structure of wear-resistant electrical contacts. Electric contacts. Collection]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958, pp. 214–223.
9. Frantsevich I.N. *Materialy elektricheskikh kontaktov* [Materials for electric contacts. Lectures of All-Union school on electrical contacts and electrodes. Collection. Part 1]. Kyiv, AN USSR IPM Publ., 1969, pp. 120–124.
10. Teodorovich O.K., D'yachenko M. E., Katsapukha S.A. *Kompozitsionnye elektrokontaktnye материалы i ekonomicheskaya effektivnost' ikh primeneniya* [Compositional electric contact materials and cost-effectiveness of their application]. Kyiv, Ukrainian NIINTI Publ., 1973, 135 p.
11. Altman A.B., Melashenko I.P., Bystrova I.S. *Sovremennyye elektrokeramicheskie kontakty* [Modern electric ceramic contacts. Electric contacts. Collection]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956, pp. 171–185.
12. Malashenko I.P. *Materialy dlya elektricheskikh kommutiruyushchikh kontaktov* [Materials for electrical switching contacts. Reference book on electric engineering materials]. Moscow, Energia Publ., 1976, pp. 743–499.
13. Frantsevich I.N., Teodorovich O.K. *Metallokeramicheskie kontakty* [Metal ceramic contacts. Electric contacts. Collection]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958, pp. 186–199.
14. Belkin G.S., Danilov I.M. *Issledovaniye osobennosti elektricheskoy erozii metallokeramicheskikh materialov* [Study on features of electric erosion of cermet materials]. *Elektrichestvo*, no. 8, pp. 63–66.
15. *Iznos materiala kontaktnykh vstavok tokopriemnikov* [Material wear of contact inserts of current collectors]. *Zheleznnye dorogi mira*, 2013, no. 10, pp. 50–56.

ABOUT THE AUTHOR

BERENT Valentin Yanovich,

Dr. Sci. (Eng.), scientific consultant of JSC "VNIIZhT"

Received 28.07.2015

Revised 23.09.2015

Accepted 15.10.2015

■ E-mail: val.berent@yandex.ru (V. Ya. Berent)

УДК 625.17:627.51 – 047.36

Сравнительная оценка методов мониторинга водных объектов, потенциально опасных для железнодорожного пути

С. Ю. ЗАВЬЯЛОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена необходимость своевременного мониторинга потенциально опасных водных объектов для предотвращения чрезвычайных ситуаций и повышения уровня безопасности движения поездов.

Проведена сравнительная оценка визуального и дистанционных методов по таким параметрам, как оперативность получения данных, возможность автоматической интеграции с ЭВМ, точность измерений, стоимость оборудования, детализированная оценка исследуемого участка по имеющимся данным, необходимость присутствия человека при измерениях, получение данных в режиме реального времени, время актуализации данных. Во время мониторинга объектов выделено два вида измерений — в пиковые периоды и в повседневной ситуации и выполнена оценка различных методов мониторинга для каждого из них.

Данный подход позволил сделать вывод о целесообразности внедрения беспилотных летательных аппаратов при мониторинге водных объектов, находящихся в непосредственной близости к железнодорожному полотну. В краткосрочной перспективе можно предложить сочетание использования беспилотных летательных аппаратов с периодическим визуальным мониторингом.

Ключевые слова: железнодорожный путь; мониторинг потенциально опасных объектов; сравнительная оценка методов мониторинга; применение пилотных и беспилотных летательных аппаратов; аэрофотосъемка; спутниковые технологии

Введение. В работах [1, 2, 3] рассмотрено негативное влияние потенциально опасных водных объектов на железнодорожный путь. Эти объекты представляют наибольшую опасность в периоды паводка, сильных проливных дождей и весеннего снеготаяния (пиковые периоды). Для обеспечения безопасности движения во всех перечисленных случаях необходим усиленный мониторинг водных объектов.

Все существующие виды такого мониторинга можно разделить на две группы: визуальный мониторинг (специалист лично проверяет с помощью различных измерительных приборов характеристики объекта) и дистанционный (с помощью современной техники).

В процессе визуального мониторинга специалист выезжает на потенциально опасный объект и с помощью водомерной рейки или приборов поплавкового

типа замеряет глубину водоема и сравнивает ее с максимальной [4]. При этом также определяется уровень прибрежной растительности и изменение границ объекта (по сравнению с последним измерением) [5]. Этот способ измерения недостаточно точен, так как вышеуказанные приборы имеют довольно большую погрешность, а качество измерения зависит от погодных условий и от квалификации персонала. Кроме того, не всегда есть возможность добраться до объекта по различным причинам: отсутствует или разрушена подъездная дорога, нехватка сотрудников в пиковые периоды и так далее.

Анализ дистанционных методов мониторинга. Дистанционный метод не требует присутствия сотрудника на потенциально опасном объекте, а данные получают при помощи следующих технических средств:

- пилотной летательной техники (аэрофотосъемки);
- беспилотной летательной техники (квадрокоптеров, омниоптеров и прочих беспилотных и летательных аппаратов);
- дистанционного зондирования Земли (путем использования данных со спутников).

Рассмотрим особенности каждого способа.

Пилотные летательные аппараты (аэрофотосъемка).

Аэрофотосъемка — фотографирование территории с высоты от сотен метров до десятков километров при помощи аэрофотоаппарата, установленного на атмосферном летательном аппарате [6]. Существенным недостатком этого метода является необходимость получения разрешения на полет. Кроме того, стоимость техники, осуществляющей фотосъемку с хорошим разрешением, крайне высока.

Что касается дистанционного зондирования Земли со спутников, то в каждой такой системе должна задействоваться орбитальная группировка из нескольких десятков искусственных спутников Земли. Срок жизни каждого спутника ограничен несколькими годами, что требует регулярной «подпитки» группировок спутников все новыми космическими аппаратами. Стоимость спутников вместе с системами их вывода на орбиту составляет десятки миллионов долларов, при этом они являются изделиями одноразового

■ E-mail: zevus1987@mail.ru (С. Ю. Завьялов)

Таблица 1

Сравнительная оценка использования визуального метода, пилотных и беспилотных летательных аппаратов и снимков, полученных с помощью спутника

Table 1

Comparative evaluation of the use of the visual method, the pilot and unmanned aerial vehicles, and images obtained via satellite

Характеристики	Оценка методов мониторинга — качественная (количественная)			
	Визуальный	Пилотные летательные аппараты	Беспилотные летательные аппараты	Спутниковые снимки
Оперативность получения данных	Низкая (1)	Средняя (2)	Средняя (2)	Высокая (3)
Возможность автоматической интеграции с ЭВМ	Нет (0)	Есть (0)	Есть (1)	Есть (1)
Точность измерений	Низкая (1)	Высокая (3)	Высокая (3)	Средняя (2)
Стоимость оборудования	Низкая (3)	Средняя (2)	Средняя (2)	Высокая (1)
Детализированная оценка исследуемого участка по имеющимся данным	Отсутствует (1)	Зависит от установленной аппаратуры (2)	Есть (3)	Зависит от установленной аппаратуры (2)
Необходимость присутствия человека при измерениях	Есть (0)	Есть (0)	Нет (1)	Нет (1)
Время актуализации данных	Среднесрочно (2)	Краткосрочно (3)	Краткосрочно (3)	Долгосрочно (1)
Получение данных в режиме реального времени	Нет (0)	Есть (1)	Есть (1)	Нет (0)
Общая количественная оценка (без учета значимости характеристик)	8	13	16	11

применения и после завершения срока своей работы превращаются в «космический мусор» или сгорают в атмосфере. Ремонту они не подлежат.

Чтобы из космоса вести фото- и киносъемку или наблюдать за каким-либо объектом, нужны 24 спутника, но и тогда информация от них будет поступать один раз в час, поскольку спутник находится над объектом наблюдения всего 15 – 20 мин, а затем уходит из зоны его видимости и возвращается на то же место, совершив оборот вокруг Земли. Объект же за это время уходит из заданной точки, поскольку Земля вращается, и снова оказывается в ней только через 24 ч, т. е. снимок можно получить только один раз в сутки. В отличие от спутника высотный беспилотный летательный аппарат сопровождает точку наблюдения постоянно. При этом наблюдение ведется не с космических, а со стратосферных высот, что позволяет повысить его качество и применить более легкую и дешевую аппаратуру. Проработав на высоте около 20 км (при детализированном мониторинге достаточно высоты до 1 км) более 24 ч, он возвращается на базу, а ему на смену в небо уходит другой. Еще одна машина находится в резерве. Таким образом достигается огромная экономия, поскольку беспилотные самолеты на порядок дешевле спутников [7, 8].

Безусловно, все перечисленные методы имеют свои достоинства и недостатки.

Сравнительная оценка методов дистанционного мониторинга. Для сравнительной оценки методов дистанционного мониторинга (табл. 1) мной предлагается выбрать следующие характеристики:

- оперативность получения данных;
- возможность автоматической интеграции с ЭВМ;
- точность измерений;
- стоимость оборудования;
- детализированная оценка исследуемого участка по имеющимся данным;
- необходимость присутствия человека при измерениях;
- получение данных в режиме реального времени;
- время актуализации данных.

Каждая характеристика оценивается по четырехбалльной шкале (от 0 до 3). Балльные оценки в табл. 1 определены исходя из анализа данных, представленных в статьях [7 – 9], посвященных методам дистанционного мониторинга наземных объектов и авторского опыта в этой области.

В рамках сравнительного анализа рассматриваемых методов, в частности, следует обратить внимание на то, что при использовании визуального метода

время актуализации данных отсчитывается от момента выезда специалиста на объект до момента получения данных специалистами, которые будут их анализировать. При использовании беспилотных летательных аппаратов время отсчитывается от момента запуска аппарата и до получения цифровых данных «на земле». При применении спутниковых технологий время рассчитывать сложнее. В связи с изменениями в постановлении Российской Федерации №326 от 28 мая 2007 г. [10], в которых говорится о возможности получения свободного доступа к спутниковым снимкам определенного разрешения, время получения данных может рассчитываться как минимум двумя способами: как время, затраченное на поиск снимка в Интернете, или как время от момента получения данных со спутника до обработки полученной информации сотрудниками соответствующих служб. Так как для проведения мониторинга необходима актуальная информация в хорошем разрешении, то время получения снимка следует рассчитывать по второму варианту. Снимок одной и той же территории, как отмечено выше, один спутник может сделать лишь раз в сутки.

Среди перечисленных характеристик сравниваемых методов особо остановимся на необходимости присутствия человека при измерениях, так как в повседневной ситуации эта характеристика не так важна,

а в пиковый (экстремальный) период — крайне значима. Это объясняется тем, что присутствие на опасном водном объекте в экстремальные периоды крайне опасно для человека.

Под характеристикой «получение данных в режиме реального времени» следует понимать видеосвязь непосредственно с места событий («в прямом эфире»), что позволит своевременно контролировать уровень опасности и его изменение как в положительную, так и в негативную сторону.

Для выбора предпочтительного метода мониторинга целесообразно ввести степень значимости каждой характеристики для двух различных ситуаций: повседневной (обычной) и пиковой (экстремальной) (табл. 2).

Для системной оценки методов мониторинга водных объектов, потенциально опасных для железнодорожного транспорта, можно предложить комплексный показатель $K_{\text{ММВО}}$, определяемый с учетом значимости характеристик методов по формуле

$$K_{\text{ММВО}} = \sum_{i=1}^n \left(O_i \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \right), \quad (1)$$

где O_i — оценка i -й характеристики для рассматриваемого метода; n — число характеристик; α_i — значимость i -й характеристики.

Таблица 2

Оценка рассматриваемых методов с учетом веса каждой характеристики для пикового и обычного периодов

Table 2

Evaluation of considered methods taking into account the value of each characteristic for normal and peak periods

Наименование критерия	Значимость характеристики		Оценка визуального метода в пиковые моменты (обычно)	Оценка пилотных летательных аппаратов в пиковые моменты (обычно)	Оценка беспилотных летательных аппаратов в пиковые моменты (обычно)	Оценка снимков со спутника в пиковые моменты (обычно)
	в пиковые моменты	в обычных ситуациях				
Оперативность получения данных	1	0,9	0,19 (0,17)	0,38 (0,35)	0,38 (0,35)	0,58 (0,52)
Возможность автоматической интеграции с ЭВМ	0,5	0,7	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,13)	0,1 (0,13)
Точность измерений	0,7	1	0,13 (0,19)	0,4 (0,58)	0,4 (0,58)	0,27 (0,38)
Стоимость оборудования	0,3	0,8	0,17 (0,46)	0,11 (0,31)	0,11 (0,31)	0,06 (0,15)
Детализированная оценка исследуемого участка по имеющимся данным	0,4	0,5	0,08 (0,1)	0,15 (0,19)	0,23 (0,29)	0,15 (0,19)
Необходимость присутствия человека при измерениях	0,8	0,4	0 (0)	0 (0)	0,15 (0,08)	0,15 (0,08)
Время актуализации данных	0,9	0,6	0,35 (0,23)	0,52 (0,35)	0,52 (0,35)	0,17 (0,11)
Получение данных в режиме реального времени	0,6	0,3	0 (0)	0,11 (0,06)	0,11 (0,06)	0 (0)
Комплексный показатель	—	—	0,92 (1,15)	1,67 (1,84)	2,00 (2,15)	1,48 (1,56)

Значимость характеристик методов мониторинга предлагается устанавливать для каждого из периодов мониторинга на основе трехэтапного алгоритма.

На первом этапе выбирается характеристика, наиболее значимая для данного периода мониторинга, которая будет играть роль «точки отсчета». (Значение «точки отсчета» при выработке прикладных оценок и решений раскрыто лауреатом Нобелевской премии Д. Канеманом в работе [11].)

На втором этапе все остальные характеристики упорядочиваются по убыванию их значимости, исходя из качественных («более значима — менее значима») попарных сравнений.

На третьем этапе каждой характеристике приписывается количественная оценка значимости. Наиболее значимая характеристика («точка отсчета») получает оценку «1», а оценки значимости остальных характеристик определяются в долях единицы (с шагом 0,1), исходя из экспертного сравнения уровня значимости данной характеристики с наиболее значимой.

Следует отметить, что как последовательность, так и количественная значимость характеристик существенно меняются в зависимости от периода мониторинга.

Так, если в обычных ситуациях важнейшей характеристикой является точность измерений, то в пиковый период — оперативность получения данных. Стоимость оборудования — одна из наиболее важных характеристик при обычных наблюдениях (значимость — 0,8) и наименее важная в пиковые периоды (значимость — 0,3).

Выбор метода, предпочтительного для организации мониторинга потенциально опасных водных объектов, осуществляется по критерию максимизации комплексного показателя:

$$K_{\text{ММВО}} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Выводы. Исходя из результатов оценки, приведенных в табл. 1 и 2, предпочтительным методом мониторинга потенциально опасных водных объектов (как в обычные, так и в пиковые периоды) является использование беспилотных летательных аппаратов. Это свидетельствует о системных преимуществах данного метода и говорит о целесообразности внедрения беспилотных летательных аппаратов при мониторинге водных объектов, находящихся в непосредственной близости к железнодорожному полотну.

С учетом необходимости использования при этом дорогостоящего оборудования и сложных технологий получения данных в ближайшей перспективе

представляется целесообразным сочетание использования беспилотных летательных аппаратов с периодической проверкой визуальным мониторингом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завьялов С. Ю. Технологии мониторинга и защиты железнодорожного пути от внешних воздействий при взаимодействии с окружающей средой // Геодезия, геоинформатика и навигация — XXI век: тезисы международной конференции. М.: МИИТ, 2012. С. 120 — 122.
2. Железнов М. М., Завьялов С. Ю. Оперативный мониторинг потенциально опасного взаимодействия железной дороги с окружающей средой // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития: сб. трудов молодых ученых ОАО «ВНИИЖТ» / под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричиани. М.: Интекст, 2013. С. 214 — 218.
3. Железнов М. М., Завьялов С. Ю. Космический мониторинг потенциально-опасного взаимодействия железной дороги с окружающей средой в сложных климатических условиях // Сборник материалов V международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», ИрГУПС, 31 марта — 4 апреля 2014 г. В 2 т. Иркутск: ИрГУПС, 2014. С. 180 — 183.
4. Корнеев П. В., Лозовая С. Ю., Лозовой Н. М. Способы повышения эффективности мониторинга водных объектов на примере измерения уровня воды в водоемах // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 12. С. 273 — 277.
5. Железнодорожный путь / Т. Г. Яковлева [и др.]. М.: Транспорт, 1999. 405 с.
6. Инженерная геодезия / А. А. Визгин [и др.]. М.: Высшая школа, 1985. 352 с.
7. Цепляева Т. П., Поздышева Е. М., Поштаренко А. Г. Анализ применения беспилотных комплексов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов. Вып. 39. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2008. С. 149 — 154.
8. Зинченко О. Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. URL: <http://www.rascurs.ru/?page=681> (дата обращения: 15.01.2016).
9. Повалишников Е., Ефимова Л., Головлева В. Применение методов дистанционного зондирования для мониторинга водных объектов в пределах ООПТ // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. Т. 2. № 11 (58). С. 99 — 107.
10. Постановление Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2014 года № 1254 «О внесении изменений в Положение о получении, использовании и предоставлении геопространственной информации». М., 2014. 2 с.
11. Kahneman D. Thinking, Fast and Slow. Publ. N. Y.: Farrar, Straus and Giroux, 2011. 512 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ЗАВЬЯЛОВ Сергей Юрьевич, аспирант АО «ВНИИЖТ», младший научный сотрудник аппарата Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 1.02.2016 г., принята к публикации 10.03.2016 г.

Comparative evaluation of methods of monitoring of water objects, potentially dangerous for the railway track

S. Yu. ZAVYALOV

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The article discusses the need for timely monitoring of potentially hazardous water objects to prevent emergency situations and improve safety of trains. There are several ways of monitoring, which can be divided into two types: visual (expert personally check potentially dangerous objects and conducts measurements) and remote. If the remote method of investigation involved various technical tools that allow to study the behavior of the object (its geometric characteristics and change over time) without the personal presence of a specialist on it. These tools include the unmanned aerial vehicles: drones, quadcopters, omnicopters; pilot aircrafts: light aircraft piloted by a pilot, as well as data obtained by aerial photography and remote sensing of the Earth by satellites.

For comparison purposes of the listed methods the following parameters have been chosen: efficiency of data acquisition, possibility of automatic integration into the computer, accuracy of measurements, equipment cost, the detailed assessment of the studied site according to the available data, need of presence of the specialist at measurements, data acquisition in real time, time for data updating. During monitoring of objects two types of measurements are allocated — during the peak periods and in a daily situation, and the assessment of different methods of monitoring for each of them is executed. At the first evaluation stage a characteristic which is the most significant for this period of monitoring is chosen, which will play a role of "reference point", at the second stage all other characteristics are arranged on decrease of their importance, proceeding from qualitative ("is more significant — is less significant") paired comparisons, at the third stage the quantitative assessment of the importance is attributed to each characteristic. The most significant characteristic ("reference point") receives an assessment "1", and estimates of the importance of other characteristics are defined in unit shares, proceeding from expert comparison of a significance value of this characteristic with the most significant. After that the total size of an assessment for each method is defined.

This approach led to the conclusion of the feasibility of the introduction of unmanned aerial vehicles in the monitoring of water objects which are in close proximity to the railway track. In the short prospect it is possible to offer a combination of use of unmanned aerial vehicles with periodic visual monitoring.

Keywords: railway track; monitoring of potentially hazardous objects; comparable assessment of monitoring methods; application of pilot and unmanned aerial vehicles; aerial photo and video shooting; satellite technologies

REFERENCES

1. Zavyalov S. Yu. *Tekhnologii monitoringa i zashchity zheleznodorozhnogo puti ot vneshnikh vozdeystviy pri vzaimodeystvii s okruzhayushchey sredoy* [Technologies of monitoring and protection of railway track from external influences when interacting with the environment. Geodesy, geoinformatics and navigation — XXI Century. Proceedings of International Conference]. Moscow, MIIT Publ., 2012, pp. 120 – 122.
2. Zheleznov M. M., Zavyalov S. Yu. *Operativnyy monitoring potentsial'no opasnogo vzaimodeystviya zheleznoy dorogi s ok-*

ruzhayushchey sredoy [Real-time monitoring of potentially dangerous interaction with the railway environment]. Rail transport at the present stage of development. Coll. works of young scientists of JSC "VNIIZhT" (Railway Research Institute). Moscow, Intext, 2013, pp. 214 – 218.

3. Zheleznov M. M., Zavyalov S. Yu. *Kosmicheskiy monitoring potentsial'no-opasnogo vzaimodeystviya zheleznoy dorogi s okruzhayushchey sredoy v slozhnykh klimaticheskikh usloviyakh* [Space monitoring of potentially dangerous interaction between the railway and the environment in difficult climatic conditions. Collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference "Transport infrastructure of Siberian region" (March – April 2014) in 2 volumes]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2014, pp. 180 – 183.

4. Korneev P. V., Lozovaya S. Yu., Lozovoy N. M. *Sposoby povysheniya effektivnosti monitoringa vodnykh ob'ektov na primere izmereniya urovnya vody v vodoemakh* [Ways to improve the efficiency of monitoring of water objects on the example of water level measurement in reservoirs]. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*, 2015, no. 12, pp. 273 – 277.

5. T. G. Yakovleva, N. I. Karpushchenko, S. I. Klinov, N. N. Putrya, M. P. Smirnov. *Zheleznodorozhnyy put'* [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 1999, 405 p.

6. Vizgin A. A., Gan'shin V. N., Kougiya V. A., Kupchinov I. I., Khrenov L. S. *Inzhenernaya geodeziya* [Engineering geodesy]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 352 p.

7. Tseplyaeva T. P., Pozdysheva E. M., Poshtarenko A. G. *Analiz primeneniya bespilotnykh kompleksov*. Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii. Sb. nauch. tr. [Analysis of the use of unmanned systems. Public information and computer integrated technologies. Collection of scientific works]. Kharkov, National aerial-cosmic institute "KhAI" Publ., 2008, vol. 39, pp. 149 – 154.

8. Zinchenko O. N. *Unmanned aerial vehicle: the application for the purpose of aerial photography for mapping* (February, 15, 2016). Available at <http://www.racurs.ru/?page=681> (in Russ.).

9. Povalishnikova E., Efimova L., Golovleva V. *Primenenie metodov distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa vodnykh ob'ektov v predelakh OOPT* [The use of remote sensing techniques for monitoring of water objects within Special Protected Natural Areas]. *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2013, vol. 2, no. 11, pp. 99 – 107.

10. Russian Federation Government Resolution of November 27, 2014 № 1254 "On Amendments to the Regulations on the receipt, use and provision of geospatial information". Moscow, 2014, 2 p. (in Russ.).

11. Kahneman D. *Thinking, Fast and Slow*. Publ. N. Y.: Farrar, Straus and Giroux, 2011, 512 p.

ABOUT THE AUTHOR

ZAVYALOV Sergey Yur'evich,
Post-graduate, junior researcher in Joint Scientific Council of JSC RZD, JSC "VNIIZhT"

Received 1.02.2016

Accepted 10.03.2016

■ E-mail: zevus1987@mail.ru (S. Yu. Zavyalov)

УДК 656.25.3:621.3.0193

Многокритериальная оценка качества отбора персонала по управлению безопасностью труда на предприятиях ОАО «РЖД»

В. М. ПОНОМАРЁВ¹, И. А. КОСАРЕВ²¹Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Москва, 127994, Россия²Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Предложена многокритериальная методика оценки качества отбора персонала по управлению безопасностью труда на предприятиях ОАО «РЖД», в основу которой положен принцип отбора по комплексу индивидуальных критериев. Один из таких подходов основан на использовании метода главных компонент (ГК).

Методика апробирована при проведении аттестации персонала в области охраны труда АО «ВНИИЖТ». Проведено тестирование сотрудников отделения «Охрана труда» по следующим показателям: мотивация, технический интеллект, техника безопасности и общие знания по охране труда.

Расчеты выполнены с привлечением программы Stadia.

Из анализа корреляционной матрицы установлено, что в исходной выборке индивидов значения их индивидуальных показателей коррелируют, поэтому применение метода ГК для построения обобщенного показателя их оценки (вместо обычной суммы индивидуальных показателей) оправданно.

Ключевые слова: безопасность труда; техника безопасности; метод главных компонент; аттестация персонала; тест; корреляционная матрица

Введение. Одной из проблем отбора персонала, занимающегося вопросами охраны труда на транспорте, является его профессионализм, позволяющий обеспечить безопасность труда при одновременном повышении эффективности функционирования предприятий.

В этом аспекте актуальными являются проблемы эффективности использования многокритериальной оценки и функционирования модели тестов, используемых при отборе персонала, занимающегося вопросами обеспечения безопасности труда на предприятиях ОАО «РЖД».

В современных рыночных условиях управление охраной труда на производстве основывается на использовании статистических методов оценки качества работы руководителя.

Многокритериальная оценка отбора персонала — оценка по комплексу индивидуальных критериев, выбираемых конкретно для отбора персонала. Один из таких подходов основан на использовании метода главных компонент (ГК), представляющего своего рода

обобщение метода диаграмм Парето для выявления основных источников изменчивости показателей качества (ПК) [1, 2]. Метод ГК предполагает переход от большого числа исходных характеристик объекта и его ПК к небольшому числу формальных обобщенных переменных — главных компонент. ГК являются линейными комбинациями исходных переменных, они взаимно ортогональны и упорядочены по величине изменчивости (дисперсии), которую они объясняют. При этом первые две или три ГК могут объяснять 60–90% указанной общей изменчивости. Анализируя результаты, полученные с применением метода ГК, можно выделить наиболее перспективного кандидата сразу по всему комплексу признаков.

Инструменты оценки деловых качеств. С точки зрения набора инструментов для оценки предлагается использовать тесты, опросники и упражнения, адаптированные, с одной стороны, под соответствующую категорию соискателей, а с другой стороны, под особенности и критерии отбора, значимые для обеспечения безопасности труда на транспорте. Для того чтобы какой-либо отборочный тест был полезен, работодатель должен быть уверен, что результат теста коррелирует с выполнением реальной работы. Другими словами, необходимо оценить действенность теста перед его исполнением.

Основные правила тестирования для отборочной программы известны [3, 4, 5] и в работе не рассматриваются.

Наиболее сложной представляется оценка работника при приеме на работу. Отличительная ее особенность в том, что предстоит изучить личные качества человека и, исходя из этого, оценить потенциальные его возможности как работника [6, 7]. Теоретической посылкой здесь служит то, что имеется весьма тесная связь между физиологическими и психическими чертами человека и результатами его деятельности [8, 9, 10].

Оценка деловых качеств работника при приеме его на работу затруднена и по существу также сводится к изучению его потенциала. Для этих целей используются: изучение документов с прежнего места работы,

■ E-mail: kosarev_2012@list.ru (И. А. Косарев)

участие претендента в разборе производственных ситуаций, оценка ситуационного поведения при собеседовании, в необходимых случаях привлекаются результаты работы на протяжении испытательного срока.

Аттестация — это процедура определения соответствия сотрудников своей должности. Компания может выбрать одну из двух существующих процедур проведения оценки, которые оказывают прямое влияние на стиль и результаты оценки [1].

«Американская» процедура оценки: оценка проводится для определения соответствия сотрудника его рабочему месту, определения тех изменений в его работе, которые произошли со времени проведения последней оценки. Результаты оценки влияют на оплату.

«Европейская» процедура оценки: акцент делается на получении обратной связи от сотрудника для планирования развития карьеры, индивидуального развития, планирования обучения. Сама процедура должна быть максимально неформальной, открытой, не приводящей к серьезным изменениям финансового и карьерного положения сотрудника.

Совместить эти две цели в одной процедуре не представляется возможным, поэтому предварительно необходимо точно определить, что является наиболее важным в данный момент времени.

Сравнительные методы подразумевают сопоставление сотрудников между собой. Среди положительных сторон данной группы методов можно отметить их простоту в использовании. Отрицательным же фактором является высокая степень субъективизма, предвзятости: значительно чаще оцениваются личностные факторы, а не результаты работы.

Абсолютные методы основаны на сравнении сотрудников с некими эталонами, прописанными факторами. Результат — ориентированные методы основаны исключительно на оценке результатов работы.

На практике наилучший результат приносит интеграция различных методов оценки.

Обобщая имеющиеся в литературе разработки, отбор можно представить как многоэтапный процесс, на каждом этапе которого решаются определенные задачи, направленные на привлечение в организацию персонала (рис. 1). Прохождение этапов может быть формализованным, закрепленным в определенных нормативно-методических документах, а может быть и неформализованным, осуществляться в сознании субъекта, отвечающего за отбор.

Физическим объектом подсистемы отбора персонала является человек, добровольно согласившийся предоставлять о себе информацию и пройти некоторые испытания, хотя при применении метода самооценки он снова выступает в роли субъекта.

Отметим, что для выполнения трудовых функций человек использует далеко не все свои характеристики и способности. Поэтому в процессе отбора оценке

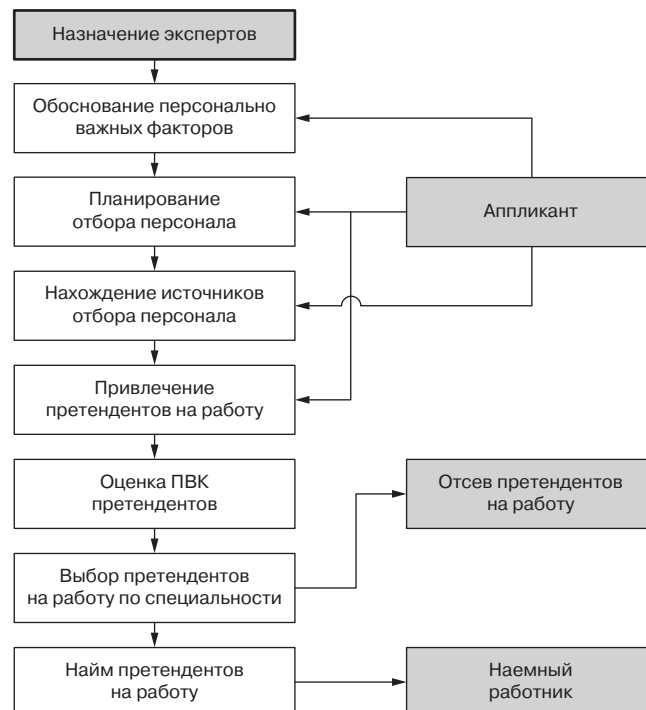


Рис. 1. Процесс отбора персонала: аппликант — в данном случае служба персонала в подразделении транспорта; ПВК — профессионально важные качества

Fig. 1. The process of personnel selection: the applicant — in this case, human resource department in the transport unit; PVK — professionally important qualities

подвергаются лишь некоторые из них, соответствующие особенностям содержания и характера предполагаемого вида труда. Часто их называют профессионально важными качествами (ПВК).

Многокритериальная оценка качества использована в работе при отборе персонала, занимающегося вопросами охраны труда на транспорте.

Опрос был проведен в группе респондентов, претендующих на позицию «специалист в области охраны труда на транспорте».

Выборка респондентов осуществлялась среди потенциальных кандидатов от 20 до 40 лет. Им предлагалось пройти четыре теста, определяющих их лич-



Рис. 2. Ход действий работы с выбранной методикой
Fig. 2. The course of action to work with the selected method

ностные качества, и пятый тест в ходе собеседования. Кандидаты не знали, какие качества будут выявлены. Представление о ходе собеседования знал каждый претендент. Указание времени, требующего ответов на тесты, заранее обговорено. Четкое интервью дает возможность кандидату структурировать свои действия. Фальсификация исключена.

Выполнен комплексный анализ соответствия кандидата профилю предполагаемой должности по пяти тестам (рис. 2).

Анализ данных тестирования респондентов выполнен в компьютерной программе Stadia и Statistica [7].

Как указывалось, качество оценки претендента на работу в области охраны труда является многокритериальным понятием. В практических задачах многокритериальной оценки приходится использовать комплекс различных показателей и критериев качества исследуемых параметров. При этом достаточно часто применяют метод построения дерева свойств, позволяющего выявить взаимосвязи качества выбранного кандидата, используя показатель интегрального качества. Эта процедура предполагает проведение соответствующего профессионально-логического анализа проблемы с экспертным оцениванием в баллах ветвей такого дерева. Достаточно распространенным способом многокритериальной оценки качества является построение обобщенного показателя качества аддитивного или мультипликативного типа, т. е. в виде линейной комбинации значений индивидуальных показателей качества (ПК) или их произведения с коэффициентами, также оцениваемыми экспертным способом. Разновидностью такого подхода

является построение функции желательности Харрингтона через желательности индивидуальных ПК, получаемых переходом от их физических значений к их значениям на психофизиологической шкале желательности.

Рассмотрим два возможных способа решения задач многокритериальной оценки качества при наличии статистической информации о значениях индивидуальных ПК. Первый из таких подходов основан на использовании функции потерь качества. Второй подход предполагает построение обобщенного показателя качества методами многомерного шкалирования для классификации исследуемых объектов в пространстве формальных обобщенных переменных типа главных компонент и главных факторов, являющихся линейными комбинациями значений регистрируемых индивидуальных ПК [2].

Привлекательность подхода с использованием формальных ПК для задач многокритериальной оценки качества состоит в его формализованности, обеспечивающей простоту его реализации и доступность для широкого круга пользователей.

При проектировании выборки данных на плоскости первых ГК на экране компьютера можно увидеть, распадается ли анализируемая выборка объектов на группы, сколько таких групп, и получить представление о том, как далеко они отстоят друг от друга. В силу ортогональности ГК в качестве меры расстояния между объектами можно использовать обычную метрику Евклида. При этом отнесение объектов в различные группы проводить, например, по величине радиусов точек, соответствующих объектам в пространстве ГК.

Пример профессионального отбора специалистов. Рассмотрим пример задач для профессионального отбора специалистов, претендующих на позицию «специалист в области охраны труда на транспорте». Такой профотбор часто проводят с помощью проверки претендентов по набору специальных тестов. Кроме того, обычно с помощью экспертов-специалистов получают контрольное (экспертное) разбиение испытуемых на однородные группы. Далее проводится сравнение формального разбиения по комплексу признаков, например, методом ГК с экспертным разбиением. Таким же образом возможна классификация сотрудников организации по комплексу их деловых качеств и построение интегрального показателя для использования его при аттестации с целью обоснованного нормирования премиальных выплат и других вознаграждений для кандидатов.

В работе при аттестации персонала в АО «ВНИИЖТ» было выбрано пять тестов, позволяющих оценить соответствие сотрудников задачам, поставленным руководством по разработке средств и технических решений по обеспечению безопасности труда на предприятиях ОАО «РЖД». Для получения результатов среди сотрудников отделения «Охрана труда,

Таблица 1

Основные тесты для определения профессионального соответствия сотрудников по обеспечению безопасности труда

Table 1

Basic tests for professional compliance of personnel to ensure the occupational safety

Основные профессионально важные качества	Свойства	Психодиагностические методики
Психофизиологические		
1. Мотивация	Определение уровня мотивации работника	Тест «Мотивационный»
2. Память	Объем кратковременной и долговременной памяти	Тест «Воспроизведение фигур»
3. Технический интеллект	Уровень технического интеллекта	Тест «Механической понятливости» Беннета
4. Техника безопасности	Определение уровня знаний в области техники безопасности	Тест «Техника безопасности»
5. Охрана труда	Логичность мышления	Тест «Сложные аналогии»

экология и промышленная безопасность» проводилась пробная оценка с целью выявления наиболее важных тестов по следующим показателям x_i : мотивация, технический интеллект, техника безопасности и охрана труда (табл. 1).

Важным параметром является рассмотрение суммы. Ошибкой анализа часто является подсчет общей суммы по всем тестам: наибольший результат остается главным показателем пригодности кандидата. Здесь следует отметить, что по сумме ориентироваться нельзя. Применение программ Stadia и Statistica помогло избежать частой ошибки. Главным показателем по выбранным кандидатам является среднее значение, полученное с использованием метода главных компонент.

Отметим, что в рассматриваемом примере возможно применить более простой альтернативный подход к экспертному оцениванию при их группировке по профессиональной пригодности. При таком подходе оценивание экспертом проводится не по системе баллов, а путем попарного сравнения претендентов по каждому из тестов. При этом происходит упорядочение — ранжирование претендентов по каждому из тестов. В этом случае для проверки различия сравниваемых трех групп операторов по степени профпригодности удобно применить многомерный ранговый Q -критерий, являющийся непараметрическим аналогом T^2 -критерия Хотеллинга [4, 5].

Рассмотренные методы решения задач многокритериальной оценки качества имеют широкие перспективы применения в различных областях приложений.

В тестировании приняли участие 18 сотрудников отделения «Охрана труда, экология и промышленная безопасность» (АО «ВНИИЖТ»), которым предлагалось ответить на вопросы, содержащиеся в пяти основных тестах (см. табл. 1). Результаты тестирования приведены в табл. 2.

Распечатка результатов проведенного анализа в стандартном формате пакета Stadia представлена ниже.

Корреляционная матрица					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
x_1	−0,07				
x_2	0,118	0,434			
x_3	−0,198	0,542	0,414		
x_4	−0,17	0,388	0,217	0,767	
x_5	−0,083	−0,581	−0,71	−0,344	−0,462

Собственные значения и процент объясняемой дисперсии факторов приведены в табл. 3.

Используя процедуру ГК, с привлечением программы Stadia в табл. 4 указаны полученные координаты объектов в системе ГК и радиусы r для каждого аттестуемого.

Из анализа проекций на плоскость ГК1 — ГК2 следует, что наиболее выделяется по особому уровню показателя мотиваций — радиусу точки r первая группа — сотрудник 11, далее сотрудники 2, 3. Вторую

Таблица 2

Результаты тестирования сотрудников

Table 2

Employee testing results					
№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	2	2	3	2	2
2	3	1	4	3	4
3	4	3	2	4	3
4	3	2	4	2	3
5	2	3	1	3	1
6	1	2	2	2	4
7	4	4	1	1	2
8	4	4	3	2	3
9	3	4	2	4	4
10	2	1	3	3	3
11	2	3	1	4	4
12	3	3	4	4	2
13	4	4	1	3	1
14	2	4	2	3	3
15	3	3	4	1	2
16	4	4	1	2	2
17	2	4	2	2	3
18	3	1	2	1	2

группу образуют сотрудники 1, 4, 15, 14, 4, 5, 8, 17, 18, 6. Далее следует третья группа: сотрудники с номерами 10, 12, 18, 13 и 1.

Сравнивая значения радиуса каждого аттестуемого в пространстве трех первых главных компонент и значения ранее вычисленного показателя, не учитывающего коррелируемость исходных пяти показателей, видим, что наиболее подготовленными являются аттестуемые под номерами 12, 10 и 7, а по результатам табл. 4 — 7, 11 и 9. В свою очередь, наименее

Таблица 3

Собственные значения и процент объясняемой дисперсии факторов

Table 3

The eigenvalues and the percentage of explained variance factors

Параметр	Фактор				
	1	2	3	4	5
Собственные значения	1,925	1,006	0,7249	0,34450	0,27501
Дисперсия, %	48,12	25,15	18,12	8,611	6,5432
Накопленная погрешность	48,12	73,27	91,39	93,453	95,5

Переменная: собственные вектора (коэффициенты поворота факторных осей).

Критическое значение = 0,3566.

Число значимых коэффициентов равно 2 (33%).

Таблица 4
Координаты объектов в системе ГК и радиусы ρ
для каждого аттестуемого

Table 4

The coordinates of objects in the MC system and ρ radii for each tested

№ п/п	ГК1	ГК2	ГК3	ρ
1	0,410059	-0,16455	-1,09149	1,177528
2	2,628271	0,186836	-1,09274	2,852506
3	2,528847	0,452577	-1,37461	2,913664
4	0,653521	0,103029	-0,4993	0,828855
5	1,57981	3,131161	-0,34931	3,524483
6	-0,09803	-0,73108	-0,63766	0,975035
7	0,805353	0,406803	4,075169	4,173857
8	-1,65282	0,185415	0,290744	1,68841
9	-0,4555	-1,65143	1,445417	2,241413
10	-4,38055	0,407355	0,379095	4,415751
11	3,634014	0,59204	1,04327	3,826876
12	-4,13497	2,498602	-0,40615	4,84829
13	-0,54576	-3,39635	-0,30277	3,453216
14	0,729115	-0,44007	-0,78017	1,15496
15	0,57868	-0,39326	-0,57067	0,902878
16	0,905945	-0,34127	0,421672	1,055939
17	-1,13975	-0,20136	0,961778	1,504858
18	-2,04623	-0,64445	-1,51229	2,624766

Таблица 5

Результаты тестирования

Table 5

Test results

1-я группа		2-я группа		3-я группа	
Результат теста	Аттестуемый	Результат теста	Аттестуемый	Результат теста	Аттестуемый
0,83	4-й	1,50	17-й	3,45	13-й
0,90	15-й	1,69	8-й	3,52	5-й
0,98	6-й	2,24	9-й	3,83	11-й
1,06	16-й	2,62	18-й	4,17	7-й
1,15	14-й	2,85	2-й	4,42	10-й
1,18	1-й	2,91	3-й	4,85	12-й

подготовленными оказались 4-й, 1-й и 6-й, причем эти данные не отличаются от данных табл. 1, так как по ее результатам наименее подготовленными стали те же аттестуемые.

Из анализа корреляционной матрицы следует, что в исходной выборке индивидов значения их индивидуальных показателей коррелируют, поэтому применение МГК для построения обобщенного показателя их оценки (вместо обычной суммы индивидуальных показателей) оправданно.

По результатам тестирования с учетом значений табл. 2 аттестуемых можно разделить на три равные группы (табл. 5).

Если проанализировать приведенные выше результаты, то можно сделать вывод, что внутри каждой из групп преобладают примерно одинаковые критерии подготовленности. К примеру, в первой группе наиболее частый отклик нашли 5-й и 14-й, во второй — 3-й, 2-й и 18-й аттестуемый, третья группа более разрозненная, среди нее у аттестуемых наибольший отклик у 12-го претендента.

Следует отметить, что для различных аттестуемых могут быть получены близкие или приблизительно одинаковые значения обобщенного показателя, но обусловленные разными значениями исходных показателей.

Выводы. 1. В рамках кибернетического подхода рассмотрены вопросы формализации объектов управления в организациях железнодорожного транспорта; разработана методология их многокритериальной оценки для принятия решений по отбору персонала по управлению безопасностью труда на предприятиях ОАО «РЖД».

2. Предложен алгоритм многокритериальной оценки качества отбора персонала по управлению безопасностью труда на предприятиях ОАО «РЖД». Показано, что многокритериальная оценка отбора персонала должна быть основана на использовании метода главных компонент, представляющего обобщение метода диаграмм Парето для выявления основных источников изменчивости показателей качества.

3. Установлено, что для аттестации персонала в области охраны труда необходимо выбрать пять тестов, позволяющих оценить соответствие сотрудников задачам, поставленным руководством по разработке средств и технических решений по обеспечению безопасности труда на предприятиях ОАО «РЖД».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 275 с.
2. Андрукович П.Ф. Применение метода главных компонент в практических исследованиях. М.: МГУ, 1973. 314 с.
3. Емельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений. М.: Знание, 1985. 32 с.
4. Кендалл М.Д., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
5. Крайнова И.А., Андреев С.А. Организация производства. М.: Недра, 2010. 121 с.
6. Кузнецов И.В., Косарев И.А. Многокритериальная оценка мотивационной деятельности персонала в организации железнодорожного транспорта // Труды 12-й научно-практ. конф. «Безопасность движения поездов». М.: МИИТ, 2011, С. XIV-80—XIV-81.
7. Кулаичев А.П. Методы и средства анализа данных в среде Windows: Stadia. М.: Информатика и компьютеры, 2002. 341 с.

8. Лисенков А. Н. О многокритериальной оценке качества // Методы менеджмента качества. 2007. № 6. С. 12 – 16.

9. Проблемы формализации и многокритериальной оценки объектов управления в организациях железнодорожного транспорта / А. Н. Лисенков [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 5. С. 34 – 40.

10. Лисенков А. Н., Кузнецов И. В., Косарев И. А. О методологии оценки приоритетов мероприятий по обеспечению безопасности объектов железнодорожного транспорта // Труды 13-й научно-практ. конф. «Безопасность движения поездов». М.: МИИТ, 2012. С. 1-4 – 1-5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОНОМАРЁВ Валентин Михайлович,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление безопасностью в техносфере», Московский государственный университет путей сообщения

КОСАРЕВ Иван Александрович,

аспирант, Московский государственный университет путей сообщения, ведущий инженер АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 30.09.2015 г., актуализирована 2.12.2015 г., принята к публикации 18.01.2016 г.

Multicriteria assessment of selection quality of personnel on safety management for work at the enterprises of JSC RZD

V.M. PONOMAREV¹, I.A. KOSAREV²

¹Moscow State University of railway engineers (MIIT), Moscow, 127994, Russia

²Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow 129626, Russia

Abstract. In article the multicriteria method of an assessment of selection quality of personnel on safety management for work at the enterprises of JSC RZD is offered which based on the principle of selection by a complex of individual criteria. One of such approaches is based on use of a method of the main component (MC). The method of group of companies assumes transition from a large number of initial characteristics of object to a small number of the formal generalized variables — main components. At the same time the first two or three groups of companies can explain 60 – 90% of the specified general variability.

In the work for personnel appraisal in the field of occupational safety and health five tests chosen by JSC "VNIIZhT" to assess compliance of employees with the goals set by guidance for development of means and technical solutions to ensure occupational safety at JSC "Russian Railways" companies. To obtain the results a trial assessment was conducted among employees of "Occupational Safety" division to identify the most important test on the following criteria: motivation, technical intelligence, security prevention instructions and general knowledge of labor protection.

The main indicator for the selected candidates is the average value of the method proposed in the article using the method of main components. The calculations are performed with the assistance of "Stadia" program.

Analysis of the correlation matrix revealed that in the original sample of individuals the value of their individual indicators are correlated, so the use of MC method for building generalized index of their evaluation (instead of usual amount of individual indicators) is justified.

Keywords: occupational safety; safety instructions; method of main components; personnel attestation; correlation matrix

REFERENCES

1. Saati T. L. *Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy* [Decision making. Method of analyzing hierarchies]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993, 275 p.
2. Andrukovich P. F. *Primeneniye metoda glavnykh komponent v prakticheskikh issledovaniyakh* [Application of method of main components in practical studies]. Moscow, Moscow State University Publ., 1973, 314 p.
3. Emelyanov S. V., Larichev O. I. *Mnogokriterial'nyye metody prinyatiya resheniy* [Multi-criteria methods of decision-making]. Moscow, Znanie Publ., 1985, 32 p.

4. Kendall M. D., Stuart A. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennyye ryady* [Multi-level statistical analysis and time ranges]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 736 p.

5. Kraynova I. A., Andreev S. A. *Organizatsiya proizvodstva* [Organization of production]. Moscow, Nedra Publ., 2010, 121 p.

6. Kuznetsov I. V., Kosarev I. A. *Mnogokriterial'naya otsenka motivatsionnoy deyatel'nosti personala v organizatsii zheleznodorozhnogo transporta*. Trudy 12 y nauchno-prakt. konf. "Bezopasnost' dvizheniya poezdov" [Multi-criteria evaluation of motivational activity of personnel in the organization of railway transport. Proceedings of the 12th scientific and practical conference "Train Traffic Safety"]. Moscow, MIIT Publ., 2011, pp. XIV-80 – XIV-81.

7. Kulaichev A. P. *Metody i sredstva analiza dannykh v srede Windows: Stadia* [Methods and data analysis tools in Windows: Stadia]. Moscow, Informatika i komp'yutery Publ., 2002, 341 p.

8. Lisenkov A. N. *O mnogokriterial'noy otsenke kachestva* [Multi-criteria quality assessment]. *Metody menedzhmenta kachestva* [Methods of quality management], 2007, no. 6, pp. 12 – 16.

9. Lisenkov A. N., Serbinenko D. V., Kuznetsov I. V., Kosarev I. A. *Problemy formalizatsii i mnogokriterial'noy otsenki ob'ektov upravleniya v organizatsiyakh zheleznodorozhnogo transporta* [Problems of formalization and multicriteria evaluation of facilities management in railway transport companies]. *Vestnik VNIIZHT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2011, no. 5, pp. 34 – 40.

10. Lisenkov A. N., Kuznetsov I. V., Kosarev I. A. *O metodologii otsenki prioriteto meropriyatiy po obespecheniyu bezopasnosti ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta*. Trudy 13 y nauchno-prakt. konf. "Bezopasnost' dvizheniya poezdov" [On the methodology for assessing the priorities of measures to ensure safety of railway transport facilities. Proceedings of the 13th scientific and practical conference "Train traffic safety"]. Moscow, MIIT Publ., 2012, pp. 1-4 – 1-5.

ABOUT THE AUTHORS

PONOMAREV Valentin Mikhaylovich,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, head of department "Safety management in the field of engineering", Moscow State University of railway engineers

KOSAREV Ivan Aleksandrovich,

Post-graduate, Moscow State University of railway engineers, leading engineer, JSC "VNIIZhT"

Received 30.09.2015

Revised 2.12.2015

Accepted 18.01.2016

■ E-mail: kosarev_2012@list.ru (I. A. Kosarev)

УДК. 656.072 – 05

Изучение влияния параметров транспортного сервиса на уровень удовлетворенности пассажиров на основе моделирования методами порядковой логистической регрессии

С. С. ПАСТУХОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. На основе изучения существующей практики маркетинговых исследований выделены три основных подхода к построению процесса сопоставления влияния различных параметров транспортного сервиса и услуг на удовлетворенность населения для целей определения приоритетных направлений реализации управленческих решений в сфере роста качества обслуживания. Изложен механизм выявления и оценки влияния параметров транспортного сервиса на удовлетворенность пассажиров для условий, когда применение корреляционно-регрессионного анализа методом наименьших квадратов не является эффективным. Представлены результаты применения предлагаемых методических подходов в рамках моделирования процессов оценки пассажирами различных аспектов транспортного обслуживания.

Ключевые слова: пассажирские перевозки; транспортный сервис; качество обслуживания; анкетный опрос; экономико-статистические модели

Введение. Переход к новой организационной структуре пассажирского комплекса, ориентированной на рыночные принципы функционирования, при наблюдаемых сейчас процессах значительной интенсификации уровня межотраслевой и внутриотраслевой конкуренции предполагает необходимость дальнейшего развития на железнодорожном транспорте механизмов управления качеством транспортного обслуживания населения, неотъемлемой частью которых является методический инструментарий маркетинговых и экономико-статистических исследований, направленных на поиск и эффективное устранение проблем, возникающих в процессе предоставления пассажирам качественного транспортного сервиса.

В современной маркетинговой практике можно выделить три направления построения процесса сопоставления влияния различных параметров обслуживания на удовлетворенность населения транспортными услугами.

Первое направление подразумевает использование механизмов прямого получения от пассажиров в рамках анкетных опросов как оценок параметров качества, так и весов их важности при формировании общего впечатления. Преимущества подхода: простота

алгоритма расчетов и возможность прямо интерпретировать результаты, определяя осознаваемые пассажиром приоритеты. Однако существует ряд весомых недостатков: не учитывается погрешность выборочных оценок приоритетов и не представлены механизмы проверки неслучайности их различий; существует риск того, что пассажирам может быть представлено избыточное количество параметров для оценки, при этом может наблюдаться желание респондентов отмечать все предложенные факторы как «очень важные», что приведет к невозможности объективного сравнения.

Второе направление (которое в настоящее время наиболее распространено, в том числе на других видах транспорта) подразумевает получение от пассажиров отдельных баллов по параметрам качества и оценки общей удовлетворенности (впечатления о поездке), а сравнительные веса влияния факторов (фактически приоритеты пассажиров) определяются путем вычисления нормированных значений регрессионных коэффициентов из линейных многофакторных моделей механизмами корреляционно-регрессионного анализа на основе метода наименьших квадратов (далее — МНК).

В 2007 – 2008 гг. лабораторией экономики и маркетинга пассажирских перевозок ВНИИЖТа совместно со специалистами Федеральной пассажирской дирекции (ФПД) в рамках развития методологии построения и использования маркетинговой информационно-управляющей системы [1, 2] была построена и внедрена в практику исследований комплексная иерархическая модель оценки пассажирами качества транспортного обслуживания в фирменных поездах, основанная на применении МНК [3, 4].

Однако реальная эффективность такого алгоритма поиска приоритетных путей роста качества обслуживания во многом связана с тем, насколько сильно исходные данные отклоняются от закона нормального распределения, а также в конечном итоге зависит от выполнения базовых предположений Гаусса — Маркова, которые на практике, особенно при малых объемах

■ E-mail: pastuhovsergey@bk.ru (С. С. Пастухов)

выборки, часто не соблюдаются, что может приводить к появлению смещения в оценках или же к ошибочному исключению важных параметров как статистически незначимых.

Для преодоления недостатков, присущих практическому использованию МНК, в рамках третьего направления построения процесса исследования характеристик качества обслуживания предусматривается использование широкого класса непараметрических методов статистики, которые отличает значительное снижение требований к спецификации анализируемых данных. Так, в [5] был предложен подход, основанный на выявлении и выработке рекомендаций по устранению тех проблем с качеством обслуживания, которые оказывают наиболее сильное статистически значимое отрицательное воздействие на пассажиров. Статистическая значимость проблем при этом определяется на основе применения устойчивых к нарушениям закона нормального распределения методов непараметрической статистики, ориентированных на определение различий в независимых выборках, что позволяет выделить и сравнить «тяжесть» проблем с качеством транспортного сервиса. Однако недостатком данного подхода (назовем его методом «сравнения проблем») является потеря части полезной информации из-за преобразования данных по качественным параметрам из n -балльных оценок к бинарному виду (т. е. наличие/отсутствие проблемы), что приводит к снижению возможностей моделирования и анализа «что, если». Таким образом, например, при использовании 5-балльных шкал оценок сложно спрогнозировать, как пассажиры будут воспринимать качество, если одновременно по первому параметру сервиса добиться увеличения удовлетворенности пассажиров с 3 до 4 баллов, а по второму — с 4 до 5, при этом допустив возможное снижение по третьему — с 5 до 4.

Таким образом, целесообразно дальнейшее развитие методологии исследования влияния параметров транспортного сервиса на уровень удовлетворенности пассажиров на основе разработки и использования таких экономико-статистических непараметрических алгоритмов, которые бы позволяли строить удобные прогнозные модели, но при этом по-прежнему отличались сниженными требованиями к спецификации исходных данных, что позволяло бы использовать их в случаях, когда линейные многофакторные модели на основе МНК не дают удовлетворительного результата.

Перспективной основой нового непараметрического статистического подхода может стать применение механизма порядковой логистической регрессии на основе метода максимума правдоподобия (далее — ПЛР), различные вычислительные аспекты которого освещаются в работах [6 – 10].

Данный подход в отличие от метода «сравнения проблем» позволяет строить прогнозные модели, при

этом, в отличие от применения линейных многофакторных моделей на основе МНК, не требуется выполнение базовых предположений Гаусса — Маркова, а также не является обязательной необходимость подчинения массива собираемых от пассажиров оценок закону нормального распределения данных. Кроме того, значительным преимуществом использования логистической регрессии является возможность изучения обособленного влияния каждой категории каждого параметра качества на общее восприятие удовлетворенности пассажира, в то время как в линейных многофакторных моделях предполагается равное влияние при переходе от категории к категории (т. е. при линейной многофакторной модели на основе МНК предполагается, что влияние на общий уровень удовлетворенности повышения оценки по отдельному фактору сервиса с 2 до 3 строго равнозначно повышению с 4 до 5, в то время как при логистической регрессии такое влияние необязательно будет равнозначным).

Следует отметить, что у порядковой логистической регрессии также имеются и свои слабые места: первое — более высокая сложность алгоритма вычислений (однако этот недостаток в значительной степени нивелируется современными возможностями вычислительных средств); второе — сложность последующего сравнения влияния факторов (так, в моделях МНК есть стандартизированные бета-коэффициенты, в методе «сравнения проблем» — интегральные критерии влияния проблемы, однако в порядковой регрессии аналогичного по удобству инструментария нет).

Выходом может стать использование механизма моделирования с последующей визуализацией его результатов в виде графиков «кумулятивного прогноза влияния факторов на воспринимаемое качество».

Предлагаемый алгоритм изучения влияния параметров сервиса на уровень удовлетворенности пассажиров на основе моделирования методами ПЛР. Использовать инструментарий порядковой логистической регрессии для целей изучения влияния параметров транспортного сервиса на уровень удовлетворенности предлагается следующим образом:

1. Осуществляется первоначальный расчет параметров модели ПЛР на основе исходных данных об уровне общей удовлетворенности качеством и значений частных оценок различных параметров сервиса.

2. Проводится проверка общих исходных критериев целесообразности применения ПЛР (формулы расчета которых представлены в [3, 7, 8, 11]). В частности, о высоком прогностическом потенциале модели можно судить по результатам расчета величины псевдо R -квадрат по методу Нагелькерке (Nagelkerke), значения которой позволяют судить о доли дисперсии результирующей переменной, которая объясняется использованной порядковой моделью на основе анализа

Таблица 1

Пример результатов оценивания параметров в модели порядковой логистической регрессии

Table 1

Example of the results of estimating the parameters in ordinal logistic regression model

Оценки параметров для порядковой логистической регрессии	Оценка	Критерий Вальда	Статистическая значимость
Порог* Y	$Y = 1$	-36,609	0,100
	$Y = 2$	-15,439	113,390
	$Y = 3$	-11,006	152,073
	$Y = 4$	-3,352	109,651
Положение** по x_1	$x_1 = 1$	0,520	0,000
	$x_1 = 2$	-3,704	4,560
	$x_1 = 3$	-2,845	18,832
	$x_1 = 4$	-1,133	12,054
Положение** по x_2	$x_2 = 1$	-35,202	0,001
	$x_2 = 2$	-10,223	0,001
	$x_2 = 3$	-1,407	2,506
	$x_2 = 4$	-0,203	0,187

*Порог для значения $Y = 5$ является избыточным (см. [1]).

**Оценка для значения $x = 5$ не приведена, так как является эталоном для сравнения вероятностей и поэтому всегда равна 0.

факторных переменных. Также полезной может оказаться проверка на основе использования критерия хи-квадрат Пирсона, статистической незначимости различий, прогнозируемых моделью, и наблюдаемых частот в разрезе шкалы значений зависимой переменной. После чего целесообразно провести расчет значений средней относительной ошибки аппроксимации (так называемой MAPE) и показателей, характеризующих долевые значения корректно классифицированных моделью наблюдений, в том числе в разрезе каждого из изучаемых рангов зависимой переменной.

3. При получении вывода о целесообразности применения ПЛР проводится детальный анализ статистической значимости влияния каждой из факторных переменных на основе расчета критерия Вальда [11] по наблюдаемым рангам факторных переменных для исключения из дальнейшего моделирования тех параметров качества, полученные оценки по которым не позволяют говорить о неслучайности их влияния на общий воспринимаемый уровень. Так, приведенные в качестве примера в табл. 1 результаты расчета критерия Вальда позволяют сделать вывод о необходимости исключения из дальнейших процедур моделирования фактора x_2 , так как влияние любого из его рангов в изучаемой выборке не может считаться статистически значимым (т. е. может быть случайным).

4. Для целей моделирования создается новый вспомогательный массив данных с изменением оценок пассажиров по факторным переменным, оказывающим статистически значимое влияние на результативную переменную в выбранных кластерах (табл. 2). При этом представляется, что улучшение обслуживания клиента по параметру, по которому он и так полностью удовлетворен (поставил максимальный балл), не должно существенно влиять на общий воспринимаемый общий уровень обслуживания, так же как и снижение по параметру, по которому балл минимально низкий (поэтому наблюдаемые в исходной выборке максимальные и минимальные значения шкал, использованных для измерения факторных переменных, остаются без изменений).

5. Проводится моделирование и оценка изменения общего уровня удовлетворенности клиентов в результате роста/снижения различных составляющих процесса обслуживания и параметров качества услуг на основе применения полученного вспомогательного

Таблица 2

Пример формирования таблицы моделирования для целей оценки изменений общего уровня удовлетворенности клиентов в результате роста/снижения различных составляющих процесса обслуживания на основе использования алгоритмов порядковой логистической регрессии

Table 2

Example of formation of the table of modeling for an assessment of changes of the general level of satisfaction of clients as a result of growth/decrease in different components of process of service on the basis of use of algorithms of ordinal logistic regression

Исходные оценки фактора x_1	Исходные оценки фактора x_2	Исходные оценки переменной Y	Вспомогательный массив данных для прогнозов		Вероятность оценки Y , полученная на базе аппарата порядковой логистической регрессии при Y , равном					Прогноз Y с учетом выбранных условий моделирования
			Модельные оценки фактора x_1 (при росте оценок на 1 балл)	Модельные оценки фактора x_2 (при снижении оценок на 1 балл)	1	2	3	4	5	
5	1	4	5	1	0,00	0,00	0,03	0,96	0,02	4
4	2	3	5	1	0,00	0,00	0,18	0,80	0,02	4
3	3	3	4	2	0,1	0,12	0,70	0,08	0,00	3
2	4	2	3	3	0,13	0,15	0,69	0,03	0,00	3
Средние значения в изучаемой выборке:										
$x_{1cp} = 3,5$	$x_{2cp} = 2,5$	$Y_{исхср} = 3$	$m_{1cp} = 4,25$	$m_{2cp} = 1,75$	—	—	—	—	—	$Y_{прогиср} = 3,5$

массива данных для построения прогнозов, используя выявленные в рамках исходной выборки параметры взаимосвязей результативной и факторной переменных.

Особенностью применения механизма порядковой логистической регрессии является прогнозирование вероятности получения каждой изучаемой категории результирующей переменной (общего воспринимаемого уровня качества) на основе параметров, получаемых при обработке исходных категорий факторных переменных (уровня качества по частным параметрам обслуживания). Система уравнений для определения вероятностей прогнозов, исходя из значений исходной выборки изучаемых данных, имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} p_{N_i} &= \frac{\exp\left(a_N - \sum_{z=1}^w b_{z_i}\right)}{1 + \exp\left(a_N - \sum_{z=1}^w b_{z_i}\right)}; \\ p_{(N+sh)_i} &= \frac{\exp\left(a_{(N+sh)} - \sum_{z=1}^w b_{z_i}\right)}{1 + \exp\left(a_{(N+sh)} - \sum_{z=1}^w b_{z_i}\right)} - \\ &\quad - \frac{\exp\left(a_{(N+(s-1)h)} - \sum_{z=1}^w b_{z_i}\right)}{1 + \exp\left(a_{(N+(s-1)h)} - \sum_{z=1}^w b_{z_i}\right)}; \\ p_{M_i} &= 1 - \sum_{s=1}^h p_{(N+(s-1)h)_i}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где p_{N_i} — вероятность получения значения результирующей переменной с минимальным рангом, имеющимся на использованной шкале измерения для наблюдения i ; p_{M_i} — вероятность получения значения результирующей переменной с максимальным рангом, имеющимся на использованной шкале измерения; $p_{(N+sh)_i}$ — вероятность получения значения результирующей переменной с любым промежуточным (выше минимального, но ниже максимального значения) рангом, превышающим минимальный ранг на s делений, при учете размера шага в h баллов имеющегося на использованной шкале измерения (как правило, в большинстве шкал размер шага составляет 1 балл); $a_i = f_i^{\text{порог}}(Y)$ — полученное на основе применения механизмов порядковой логистической регрессии к данным изучаемой исходной выборки значение «порога» результирующей переменной с заданным рангом (т.е., например, a_N — «порог» для оценки вероятности появления минимального для используемой шкалы измерения значения результирующей переменной); $b_{z_i} = f_i^{\text{полож}}(x_z)$ — полученное

на основе применения механизмов порядковой логистической регрессии к данным изучаемой исходной выборки значение «положения» для факторной переменной, характеризующей изучаемый частный параметр z качества сервиса; w — общее количество частных параметров сервиса, включенных в модель исследования.

Таким образом, для каждого i -го наблюдения прогноз для результирующей переменной строится на основе выбора той категории на шкале ее измерения, которая имеет наибольшую вероятность появления.

В свою очередь, при моделировании (см. табл. 2) мы осуществляем построение новых прогнозов на основе замены в (1) параметров b_{z_i} на $b_{z_i}^{m+}$ (при оценке влияния роста качества частного параметра) или на $b_{z_i}^{m-}$ (при оценке влияния снижения):

$$\left\{ \begin{aligned} b_{z_i}^{m+} &= f_i^{\text{порог}}(m_z^+); \\ b_{z_i}^{m-} &= f_i^{\text{порог}}(m_z^-); \\ m_{z_i}^+ &= x_{z_i} + r_{z_i}, 0 \leq r_{z_i} \leq M - x_{z_i}; \\ m_{z_i}^- &= x_{z_i} - r_{z_i}, 0 \leq r_{z_i} \leq x_{z_i} - N, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $b_{z_i}^{m+}$ и $b_{z_i}^{m-}$ — полученные на основе применения механизмов порядковой логистической регрессии к данным смоделированной выборки (при росте/снижении качества) значения «положения» для факторной переменной, характеризующей изучаемый частный параметр z сервиса; x_{z_i} — наблюдаемое в исходной выборке значение для z -го частного параметра качества; r_{z_i} — выбранное значение прироста/снижения изучаемого z -го частного параметра качества; M и N — максимальное и минимальное значение шкалы, используемой для измерения частных параметров качества.

6. Проводится сопоставление полученных в ходе моделирования изменений среднего значения общего уровня удовлетворенности клиентов под воздействием роста/снижения различных составляющих процесса обслуживания и параметров качества услуг и визуализация результатов в виде графиков, которые предлагается называть «кумуляты прогноза влияния факторов на воспринимаемое качество». На рис. 1 представлен пример построения кумулят прогноза изменения впечатления пассажиров о поездке в купе фирменного поезда при обеспечении последовательного изолированного роста воспринимаемого пассажирами качества по каждому из выделенных статистически значимых факторов (горизонтальная линия представляет исходный средний уровень удовлетворенности в выборке, точки на ней — средние уровни качества параметров, оцененные пассажирами; точки на ломаных линиях показывают, как будет изменяться общий уровень удовлетворенности при последовательном изолированном росте качества по каждому из рассматриваемых параметров

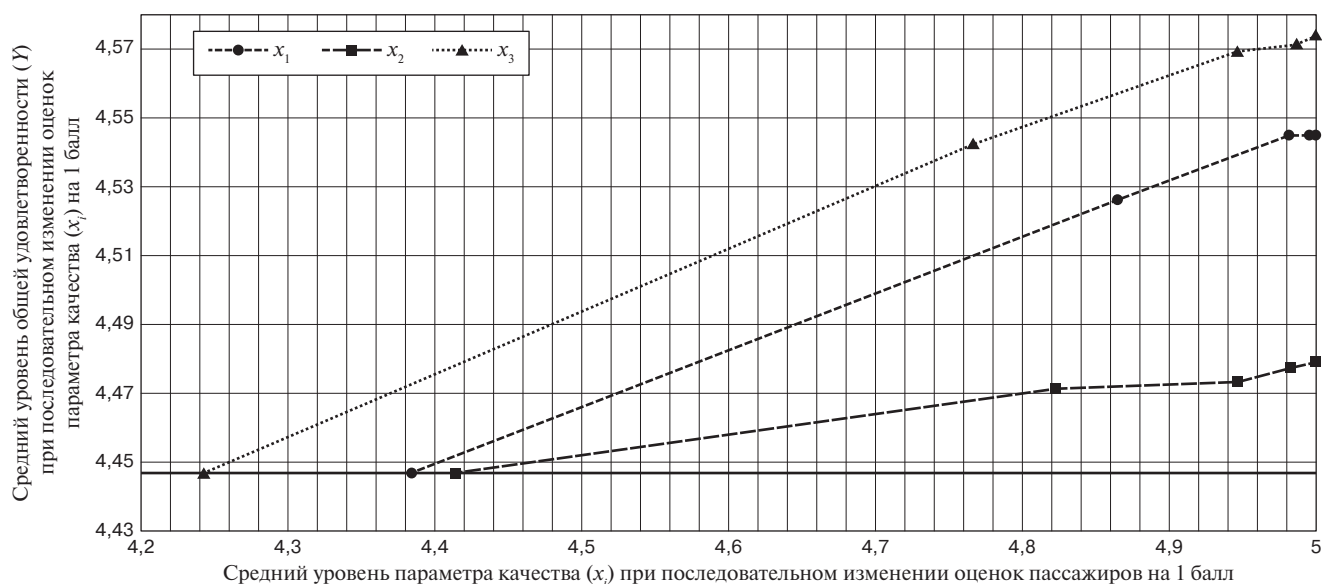


Рис. 1. Пример построения кумулятивного прогноза для целей сравнения изменения общего впечатления пассажиров о поездке в купе фирменного поезда при обеспечении последовательного изолированного роста качества по выделенным на основе логистической регрессии отдельным статистически значимым факторам обслуживания (2007 г.)

Fig. 1. Example of building the cumulative forecast for the purposes of comparison of changes in overall impression of passengers traveling in the compartment of the branded train, while ensuring consistent isolated quality growth in dedicated separate statistically significant factors of service on the basis of logistic regression (2007)

сервиса, в данном случае — с шагом в 1 балл). На рис. 2 приведены аналогичные кумуляты прогноза для случая оценки последствий снижения качества по каждому из факторов. Следует отметить, что наличие ломаных линий на рис. 1 и 2 как раз и отражает учет в данном методе возможной неравнозначности влияния каждой отдельной категории изучаемого фактора

на результирующую переменную (т. е. на аналогичных графиках для моделей МНК были бы представлены не ломаные, а прямые линии).

Сравнительная оценка эффективности работы предлагаемого непараметрического алгоритма изучения влияния параметров сервиса на уровень удовлетворенности пассажиров. Работа предлагаемого механизма

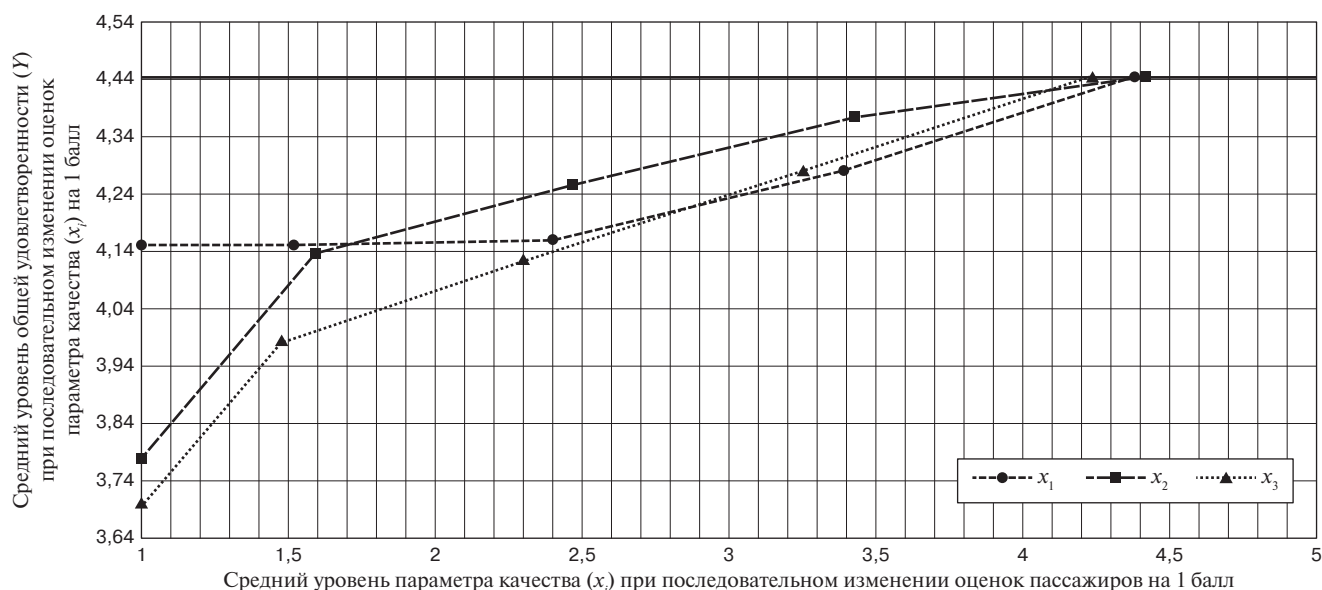


Рис. 2. Пример построения кумулята прогноза для целей сравнения изменения общего впечатления пассажиров о поездке в купе фирменного поезда при возможном снижении качества по выделенным на основе логистической регрессии отдельным статистически значимым факторам обслуживания (2007 г.)

Fig. 2. Example of building the cumulative forecast for the purposes of comparison of changes in overall impression of passengers traveling in the compartment of the branded train, with the possible reducing quality in dedicated separate statistically significant factors of service on the basis of a logistic regression (2007)

Таблица 3

Результаты сравнения ошибок прогноза в моделях МНК и ПЛР

Table 3

The results of the comparison of the forecast error in the MNK and PLR models

Год	Модель оценки	MAPE модели МНК (без округления прогнозов)	MAPE модели МНК (с округлением прогнозов)	MAPE модели ПЛР	Рост эффективности прогнози- рования
1	2	3	4	5	Графа 6 = графа 4/графа 5
2007	Обслуживание в вагоне-ресторане фирменного поезда	8,68%	5,34%	3,65%	1,46
2007	Качество набора питания в фирменных поездах	7,68%	4,27%	3,57%	1,20
2007	Комфортабельность купейного вагона фирменного поезда	7,14%	5,35%	3,78%	1,41
2011	Обслуживание в вагоне-ресторане фирменного поезда	5,58%	4,17%	3,54%	1,18
2011	Обслуживание в вагоне-ресторане нефирменного поезда	6,38%	4,50%	2,97%	1,52
2011	Качество набора питания в фирменных поездах	5,52%	3,80%	2,58%	1,48



Рис. 3. Результаты сравнения эффективности моделей МНК и ПЛР на основе сопоставления общей доли корректно классифицированных моделью оценок общего уровня качества сервиса

Fig. 3. The results of comparing the effectiveness of MNK and PLR models by comparing the total share of correctly classified assessments of total level of service quality by model

выявления приоритетов пассажиров, базирующегося на использовании метода порядковой логистической регрессии, была опробована на массиве данных анкетных опросов 2007 и 2011 гг., по которым результаты применения МНК по тем или иным причинам оказались неудовлетворительными (т. е. были получены низкие оценки качества работы модели либо не выполнялись предположения Гаусса — Маркова). При этом результаты моделирования на основе ПЛР сравнивались с соответствующими результатами применения линейных многофакторных моделей на базе МНК путем сравнения:

- средней относительной ошибки аппроксимации, так называемой MAPE (формулы расчета представлены в [3, 11]);
- общей доли корректно классифицированных моделью результирующих оценок удовлетворенности;
- долей корректно классифицированных моделью оценок в разрезе баллов общей удовлетворенности пассажиров.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о возможности значительного повышения качества моделирования и построения прогнозов при

применении предлагаемого алгоритма порядковой логистической регрессии там, где линейные многофакторные модели дают неудовлетворительный результат.

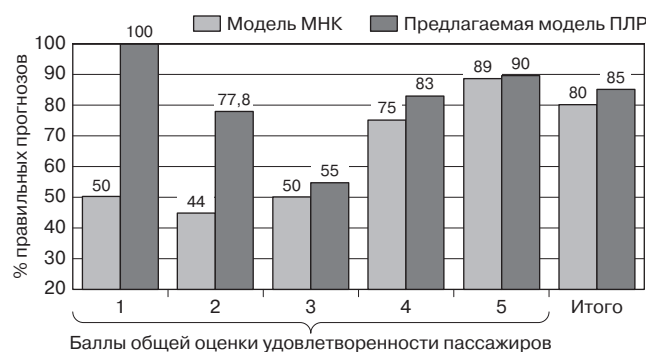


Рис. 4. Результаты сравнения эффективности моделей МНК и ПЛР на основе сопоставления доли корректно классифицированных моделью оценок в разрезе баллов общей удовлетворенности пассажиров при оценке уровня комфорта при поездке в купейных вагонах фирменных поездов (2007 г.)

Fig. 4. The results of comparing the effectiveness of MNC and PCR models by comparing the share of correctly classified assessments by model in the context of the overall passenger satisfaction score when evaluating the level of comfort during traveling in the compartment of the car of branded trains (2007)



Рис. 5. Комплексный механизм изучения влияния параметров транспортного сервиса на уровень удовлетворенности пассажиров
Fig. 5. A comprehensive studying mechanism of the influence of transport service parameters on the level of passenger satisfaction

Так, MAPE при использовании нового подхода сократилась от 1,2 до 1,5 раза и стала для всех моделей ниже порогового уровня на 4% (табл. 3).

Общая доля корректно классифицированных оценок выросла, прирост для всех моделей составил от 2 до 6% (рис. 3). Особо следует подчеркнуть, что причиной этого роста явилось существенное увеличение эффективности классификации по наиболее важным с точки зрения реализации механизма управления качеством «проблемным категориям», что продемонстрировано на примере модели оценки комфортности купейного вагона фирменного поезда (рис. 4). При этом можно говорить о значительно более высокой надежности всех получаемых модельных оценок, так как в отличие от МНК не наблюдалось нарушения предпосылок оптимальности использования данного статистического инструментария.

Вывод. Представленный механизм определения приоритетных направлений роста качества транспортного обслуживания ни в коем случае не отменяет уже имеющиеся, а органично их дополняет. Что позволяет, исходя из практических правил проведения статистических исследований [12] и особенностей массива имеющихся исходных данных, предложить

следующий единый комплексный механизм изучения приоритетов пассажиров, направленный на привлечение максимума объективной информации, необходимой для принятия управленческих решений (рис. 5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошниченко О.Ф., Милевская В.А., Пастухов С.С. Информационные технологии в маркетинговых исследованиях пассажирских железнодорожных перевозок // Экономика железных дорог. 2007. № 8. С. 71 – 80.
2. Мирошниченко О.Ф., Милевская В.А., Пастухов С.С. Комплексная система маркетинговых исследований рынка пассажирских перевозок дальнего следования // Экономика железных дорог. 2008. № 3. С. 41 – 58.
3. Пастухов С.С. Определение приоритетов пассажиров при оценке качества и выявление наиболее эффективных направлений улучшения качества транспортной услуги и сервиса в фирменных поездах (методология и результаты) // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 1. С. 23 – 27.
4. Пастухов С.С. Определение основных путей повышения эффективности работы вагонов-ресторанов на основе маркетингового анализа // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 2. С. 42 – 47.
5. Пастухов С.С. Определение приоритетных направлений улучшения качества транспортного обслуживания пассажиров в условиях неизвестности реального закона распределения изучаемых данных // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 1. С. 22 – 25.
6. McKelvey, R., Zavoina W. A statistical model for the analysis of ordinal level dependent variables // Journal of Mathematical Sociology. 1975. № 4, pp. 103 – 120.
7. McCullagh, P. Regression Models for Ordinal Data // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. 1980. №42(2), pp. 109 – 142.
8. Pregibon, D. Logistic Regression Diagnostics // Annals of Statistics. 1981. № 9, pp. 705 – 724.
9. Anderson, J. A. Regression and ordered categorical variables [with discussion] // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. 1984. № 46, pp. 1 – 40.
10. Jennings, D. E. Judging inference adequacy in logistic regression // Journal of the American Statistical Association. 1986. № 81, pp. 471 – 476.
11. Econometric analysis / William H. Greene. 7-th ed. Prentice Hall, 2012. 1232 p.
12. Carmen Wilson, VanVoorhis, Betsy Levonian Morgan. Statistical Rules of Thumb: What We Don't Want to Forget About Sample Sizes // The National Honor Society in Psychology, 2001, vol. 6, no. 4, pp. 139 – 141.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ПАСТУХОВ Сергей Сергеевич,
канд. экон. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории
«Экономика и маркетинг пассажирских перевозок»,
АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 30.09.2015 г., актуализирована
2.12.2015 г., принята к публикации 17.02.2016 г.

Study on influence of transport service parameters on the level of passenger satisfaction on the basis of modeling by methods of ordinal logistic regression

S. S. PASTUKHOV

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow 129626, Russia

Abstract. On the basis of studying of the existing practice of market researches three main approaches are identified for creation of comparison process of influence of different parameters of transport services for satisfaction of the population in order to define the priority directions of implementation of administrative decisions in the field of growth of service quality: direct receiving priorities from passengers; calculation on the basis of using mechanisms of the correlation and regression analysis by method of the smallest squares; calculation which is based on application of different types of nonparametric methods of statistics.

An analysis of the advantages and disadvantages of existing methodological approaches to comparative assessment of the quality of the growth paths of service and services was presented that resulted in the necessity of further development of mechanisms based on the use of nonparametric methodological tools, focused on the construction of convenient predictive models.

Methodical and practical approaches to identifying promising areas to improve the quality of public services were proposed and based on the modeling, comparison and visualization of the results of assessment of the impact of different transport service parameters on the overall quality of service by methods of ordinal logistic regression.

The approbation and assessment of the effectiveness of the proposed methodological approaches was performed on an array of marketing data about the demand of railway passengers for cases when the use of regression analysis of least squares method was ineffective.

As a result, it is proposed to use an integrated mechanism of studying the effect of different service options at the level of passenger satisfaction, which includes a set of parametric and nonparametric statistical methods, and aimed at obtaining the maximum of objective information necessary for management decision-making in the field of quality growth of transport service.

Keywords: passenger transport; travel service; service quality; questionnaire survey; economic and statistic models

REFERENCES

1. Miroshnichenko O. F., Milevskaya V. A., Pastukhov S. S. *Informatsionnye tekhnologii v marketingovykh issledovaniyakh passazhirskikh zheleznodorozhnykh perevozok* [Information technologies in marketing research of passenger railway transport]. *Economika zheleznichnykh dorog*, 2007, no. 8, pp. 71 – 80.
2. Miroshnichenko O. F., Milevskaya V. A., Pastukhov S. S. *Kompleksnaya sistema marketingovykh issledovaniy rynka passazhirskikh perevozok dal'nego sledovaniya* [A comprehensive system of market research of long-distance passenger transportation]. *Economika zheleznichnykh dorog*, 2007, no. 3, pp. 41 – 58.

3. Pastukhov S. S. *Opreделение приоритетов пассажиров при оценке качества и выявление наиболее эффективных направлений улучшения качества транспортной услуги и сервиса в фирменных поездах (методология и результаты)* [Determination of passenger priorities in evaluating the quality, and identification the most effective areas to improve the quality of transport services in the branded trains (methodology and results)]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2008, no. 1, pp. 23 – 27.

4. Pastukhov S. S. *Opreделение основных путей повышения эффективности работы вагонов-ресторанов на основе маркетингового анализа* [Identification of the main ways to increase the efficiency of the dining cars on the basis of market analysis]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2008, no. 2, pp. 42 – 47.

5. Pastukhov S. S. *Opreделение приоритетных направлений улучшения качества транспортного обслуживания пассажиров в условиях неопределенности реального закона распределения изучаемых данных* [Identification of priority areas to improve the quality of transport service for passenger in conditions of uncertainty of the real law of distribution of the studied data]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2008, no. 1, pp. 22 – 25.

6. McKelvey R., Zavoina W. *A statistical model for the analysis of ordinal level dependent variables*. *Journal of Mathematical Sociology*, 1975, no. 4, pp. 103 – 120.

7. McCullagh P. *Regression Models for Ordinal Data*. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 1980, no. 42(2), pp. 109 – 142.

8. Pregibon D. *Logistic Regression Diagnostics*. *Annals of Statistics*, 1981, no. 9, pp. 705 – 724.

9. Anderson J. A. *Regression and ordered categorical variables (with discussion)*. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 1984, no. 46, pp. 1 – 40.

10. Jennings D. E. *Judging inference adequacy in logistic regression*. *Journal of the American Statistical Association*, 1986, no. 81, pp. 471 – 476.

11. William H. Greene. *Econometric analysis*. Prentice Hall Publ., 2012, 1232 p.

12. Carmen Wilson, VanVoorhis, Betsy Levonian Morgan. *Statistical Rules of Thumb: What We Don't Want to Forget About Sample Sizes* // *The National Honor Society in Psychology*, 2001, vol. 6, no. 4, pp. 139 – 141.

ABOUT THE AUTHOR

PASTUKHOV Sergey Sergeevich,

Cand. Sci. (Econ.), leading researcher of laboratory "Economy and marketing of passenger transport", JSC "VNIIZhT"

Received 30.09.2015

Revised 2.12.2015

Accepted 17.02.2016

■ E-mail: pastuhovsergey@bk.ru (S. S. Pastukhov)

УДК 629.4.027: 620.179.162

Совершенствование ультразвукового контроля осей колесных пар подвижного состава железных дорог

А. Н. КИРЕЕВ^{1,2}, В. А. ВИТРЕНКО²¹Публичное акционерное общество «Лугансктепловоз», Луганск, 91005, Украина²Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования, Луганск, 91034, Украина

Аннотация. Предлагается безэталонный метод настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвукового дефектоскопа при контроле осей колесных пар подвижного состава железных дорог, позволяющий исключить при контроле недостатки применения стандартных образцов предприятия и метода диаграмм амплитуда — расстояние — диаметр и, соответственно, повысить достоверность результатов ультразвукового контроля.

Для автоматизации расчетов при настройке функции временной регулировки чувствительности ультразвукового дефектоскопа разработан программный продукт «NDTRT-18».

Разработана методика настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвукового дефектоскопа. Представлен результат практической настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвукового дефектоскопа УД 2-70 с применением разработанного безэталонного метода для ультразвукового контроля подступичной части локомотивной оси диаметром 235 мм.

Предлагаемый безэталонный метод и программный продукт успешно внедрены в Публичном акционерном обществе «Лугансктепловоз» в технологический процесс контроля осей колесных пар магистральных тепловозов 2ТЭ116У, 3ТЭ116У, 2ТЭ116УД ультразвуковым эхоимпульсным методом.

Ключевые слова: подвижной состав железных дорог; ось колесной пары; техническое диагностирование; неразрушающий контроль; ультразвуковой контроль; эхоимпульсный метод; временная регулировка чувствительности

Введение. В настоящее время с повышением скоростей движения на железных дорогах, увеличением объемов перевозок грузов и пассажиров особое внимание уделяется безопасности движения на железных дорогах.

На безопасность движения на железных дорогах влияет множество факторов, таких как состояние рельсового пути, исправная работа систем сигнализации и автоматики, а также качество и надежность подвижного состава.

Одной из наиболее ответственных систем подвижного состава является экипажная часть. Поддержание на высоком уровне технического состояния элементов экипажной части является неотъемлемым условием обеспечения безопасности на железных дорогах.

Анализ проблемы и постановка задачи. В процессе изготовления и эксплуатации элементы экипажной части подвергаются техническому диагностированию во избежание возникновения производственных и эксплуатационных отказов [1]. В состав технического диагностирования входит множество контрольных операций, в том числе и ультразвуковой неразрушающий контроль элементов экипажной части на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей.

Одним из ответственных элементов экипажной части подвижного состава является ось колесной пары. Разрушение оси вследствие наличия в ней дефектов типа нарушения сплошности может привести к серьезной аварии на железной дороге. На рис. 1 представлен пример излома вагонной оси, вследствие которого произошел сход грузового вагона на прямом участке пути Донецкой железной дороги, который повлек за собой высокий экономический ущерб [2].

В соответствии с РД 32.144–2000 «Контроль неразрушающий приемочный. Колеса цельнокатаные, бандажи и оси колесных пар подвижного состава. Технические требования» и ГОСТ 33200–2014 «Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия» (дата введ. в действие 1.04.2016 г.) оси колесных пар в процессе изготовления подвергаются ультразвуковому контролю на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей в осевом, радиальном направлениях и наклонным преобразователем зоны гантельных переходов.

Технологические несплошности, возникающие в осях вследствие нарушения технологических процессов изготовления, расположены преимущественно в центре или вблизи центра сечения оси и вытянуты вдоль оси. Такие несплошности наиболее полно выявляются в результате ультразвукового контроля с цилиндрической поверхности в радиальном направлении (рис. 2).

Существующая технология ультразвукового контроля осей колесных пар в радиальном направлении несовершенна вследствие влияния некоторых

■ E-mail: lifter_23@mail.ru (А. Н. Киреев)

факторов, которые будут описаны ниже, уменьшающих достоверность результатов контроля.

Цель научного исследования — совершенствование ультразвукового контроля осей колесных пар подвижного состава железных дорог за счет повышения достоверности результатов контроля.

Основная часть. Контроль оси колесной пары в радиальном направлении осуществляется с цилиндрической поверхности эхоимпульсным акустическим методом [3–5].

Определение допустимости несплошностей, обнаруженных в процессе ультразвукового контроля, осуществляется на эталонных отражателях, выполненных в стандартных образцах предприятия. В качестве эталонных отражателей применяются плоскодонные цилиндрические отражатели диаметром 3 и 5 мм, расположенные на минимальном, максимальном расстоянии и в середине контролируемого диапазона: отражатель диаметром 5 мм служит для настройки оценочного уровня чувствительности и определения допустимости несплошности по амплитудной характеристике; отражатель диаметром 3 мм — для настройки контрольного уровня чувствительности и определения допустимости несплошностей по протяженности и количеству. Для настройки чувствительности изготавливают несколько стандартных образцов предприятия для контроля разных диаметров оси колесной пары. В стандартном образце предприятия выполняют шесть эталонных отражателей: три отражателя диаметром 3 мм, три отражателя диаметром 5 мм.

Изготовление стандартных образцов предприятия — дорогой и технологически трудновыполнимый процесс. В результате влияния множества факторов, таких как неточность инструмента, технологического оборудования, исполнителя и др., в стандартных образцах предприятия могут возникать следующие несоответствия техническим требованиям:

- отсутствие параллельности плоского дна эталонного отражателя и касательной плоскости к точке ввода центрального луча ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя (рис. 3, а), вследствие чего отраженная волна от плоскодонного цилиндрического отражателя уходит в сторону и не вся ее энергия принимается преобразователем;
- отсутствие плоскостности эталонного отражателя (рис. 3, б), вследствие чего отраженная волна от плоскодонного цилиндрического отражателя расходится в стороны и не вся ее энергия принимается преобразователем;
- высокая шероховатость поверхности плоского дна эталонного отражателя (рис. 3, в), вследствие чего ультразвуковая волна рассеивается на поверхности плоскодонного цилиндрического отражателя и уменьшается амплитуда принятого сигнала;

Рис. 1. Фото излома оси колесной пары грузового вагона

Fig. 1. Pictures of axle breakage of freight cars



- вследствие технологических неточностей изготовления стандартных образцов предприятия могут возникать и другие несоответствия техническим требованиям, которые уменьшают амплитуду принятого пьезоэлектрическим преобразователем эхо-сигнала.

Также большое влияние на уменьшение достоверности результатов ультразвукового контроля осей колесных пар оказывает разница в затухании ультразвуковой волны при ее прохождении в контролируемой оси и в стандартном образце предприятия.

Коэффициент затухания ультразвука состоит из коэффициентов поглощения δ_n и рассеивания δ_p : $\delta = \delta_n + \delta_p$. На величину поглощения (преобразование энергии ультразвуковой волны в тепловую энергию) влияют потери на дефектах кристаллических решеток, термоупругие эффекты, трение дислокаций, фонон-фононное взаимодействие, взаимодействие



Рис. 2. Процесс ультразвукового контроля локомотивной оси с цилиндрической поверхности в радиальном направлении

Fig. 2. Process of ultrasonic inspection of locomotive axis with the cylindrical surface in the radial direction

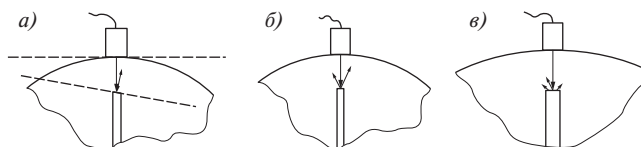


Рис. 3. Возможные несоответствия эталонных отражателей в стандартных образцах предприятия техническим требованиям
Fig. 3. Possible inconsistencies of reference reflectors in standard enterprise samples to technical requirements

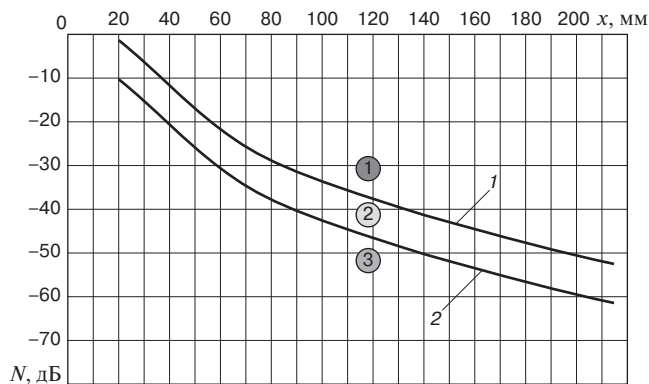


Рис. 4. АРД-диаграмма:
кривая 1 — для диаметра плоскодонного цилиндрического отражателя 5 мм; кривая 2 — для диаметра плоскодонного цилиндрического отражателя 3 мм
Fig. 4. ARD-diagramm:
Curve 1 — for 5-mm diameter flat bottom cylindrical refractor;
Curve 2 — for 3-mm diameter flat bottom cylindrical refractor

фононов с электронами проводимости, взаимодействие ультразвука с колебаниями кристаллических решеток, магнитоупругие эффекты [6]. Коэффициент поглощения в металлах и сплавах пропорционален частоте ультразвуковой волны [7], при этом коэффициент поглощения для продольных волн больше, чем для поперечных.

При рассеивании энергия акустической волны остается звуковой, однако уходит от направления распространения вследствие отражения от неоднородностей среды. Металлы и сплавы имеют поликристаллическое строение, и в них затухание определяется прежде всего рассеиванием. Рассеивание ультразвука обусловлено тем, что поликристаллический материал не является строго однородным. В нем встречаются граничные поверхности, на которых звуковое сопротивление изменяется [8].

Контролируемая ось и стандартный образец предприятия могут иметь слегка отличающийся структурно-фазовый состав. Превышение коэффициентом затухания в контролируемой оси значения коэффициента затухания в материале стандартного образца предприятия приведет к тому, что эхо-сигнал от дефекта будет классифицироваться как эхо-сигнал от допустимой несплошности, а в обратном случае — эхо-сигнал от допустимой несплошности будет классифицироваться как эхо-сигнал от дефекта.

Для исключения перечисленных выше недостатков применения стандартных образцов предприятия целесообразен переход к безэталонному методу классификации несплошностей при ультразвуковом контроле осей колесных пар, основанному на изучении закона, описывающего связь между амплитудной характеристикой ультразвукового эхо-сигнала от несплошности и ее размерами, глубиной залегания и параметрами объекта контроля.

Для расчета амплитудной характеристики донного эхо-сигнала в оси колесной пары в радиальном направлении используется аналитическая зависимость

$$N_d = 20 \lg \left(\frac{S_a}{2\lambda D} e^{-2\delta D} \right), \quad (1)$$

где λ — длина ультразвуковой волны, мм; S_a — площадь преобразователя, мм²; D — диаметр контролируемого участка оси, мм; δ — коэффициент ослабления ультразвуковой волны, Нп/мм.

Коэффициент δ в выражении (1) характеризует ослабление ультразвуковой волны при ее прохождении в оси колесной пары не только за счет затухания, но и за счет ввода через выпуклую цилиндрическую поверхность, которая играет роль расфокусирующей линзы для ультразвука.

Из выражения (1) находим аналитическую зависимость для расчета коэффициента ослабления ультразвуковой волны при ее прохождении в оси колесной пары в радиальном направлении:

$$\delta = - \frac{\ln \left(\frac{10^{(N_d/20)} 2\lambda D}{S_a} \right)}{2D}. \quad (2)$$

Отражение ультразвуковой волны от плоскодонного цилиндрического отражателя описывается аналитической зависимостью [9–11]

$$N = 20 \lg \left(\frac{S_a S_b}{\lambda^2 x^2} e^{-2\delta x} \right), \quad (3)$$

где S_b — площадь плоскодонного цилиндрического отражателя, мм²; x — расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до отражателя, мм.

Из выражений (2) и (3) получаем

$$N = 20 \lg \left(\frac{S_a S_b}{\lambda^2 x^2} \left(\frac{10^{(N_d/20)} 2\lambda D}{S_a} \right)^{\frac{x}{D}} \right). \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), для расчета амплитудной характеристики ультразвукового эхо-сигнала от плоскодонного цилиндрического отражателя необходимо знать амплитудную характеристику донного эхо-сигнала на контролируемом участке оси, которая измеряется непосредственно в контролируемой оси на бездефектном участке.

По результатам измерения амплитудной характеристики донного эхо-сигнала на контролируемом участке оси, воспользовавшись аналитической зависимостью (4), строится диаграмма амплитуда — расстояние — диаметр (АРД-диаграмма) для диаметров плоскодонных цилиндрических отражателей 3 и 5 мм [12].

На рис. 4 представлена АРД-диаграмма для участка локомотивной оси диаметром 235 мм, амплитуда

донного эхо-сигнала $N_d = -35$ дБ (на бездефектном участке).

При выявлении в контролируемой оси эхо-сигнала от несплошности его оценка осуществляется следующим образом:

- в случае попадания значения амплитудной характеристики эхо-сигнала от несплошности в область 1 (см. рис. 4) АРД-диаграммы несплошность классифицируется как дефект;
- в случае попадания значения амплитудной характеристики эхо-сигнала от несплошности в область 2 или на кривую 1 АРД-диаграммы осуществляется оценка несплошностей по протяженности, количеству и условному расстоянию между несплошностями следующим образом — ось признается несоответствующей техническим требованиям, если:

- 1) в оси выявляются шесть или больше эхо-сигналов от несплошностей;
- 2) минимальное условное расстояние между любыми двумя несплошностями меньше 50 мм;
- 3) когда условная протяженность несплошности больше 40 мм;

- в случае попадания значения амплитудной характеристики эхо-сигнала от несплошности в область 3 или на кривую 2 АРД-диаграммы несплошность классифицируется как допустимая.

При оценке несплошностей в оси колесной пары при помощи АРД-диаграмм контроль оси необходимо осуществлять при чувствительности поиска, которая превышает на 6 дБ амплитуду эхо-сигнала от эталонного отражателя диаметром 5 мм, расположенного на максимальной глубине в контролируемом диапазоне. Однако контроль с такой чувствительностью приведет к повышенному уровню шумов в начале временной развертки ультразвукового дефектоскопа. На рис. 5 представлено фото экрана ультразвукового дефектоскопа УД 2-70, настроенного на чувствительность поиска для контроля подступичной части локомотивной оси диаметром 235 мм. Из рис. 5 виден повышенный уровень шумов приблизительно на 35% диапазона контроля.

Для того чтобы избавиться от описанного выше недостатка применения АРД-диаграмм, целесообразно применение функции временной регулировки чувствительности (функции ВРЧ), имеющейся у большинства современных ручных ультразвуковых дефектоскопов, позволяющей получить одинаковую амплитуду эхо-сигналов от равновеликих отражателей во всем контролируемом диапазоне.

Впервые был разработан новый математический аппарат для безэталонной настройки функции ВРЧ ультразвукового дефектоскопа при контроле осей колесных пар с цилиндрической поверхности в радиальном направлении по пяти точкам. На рис. 6 представлены основные аналитические зависимости для настройки функции ВРЧ ультразвукового дефектоскопа.

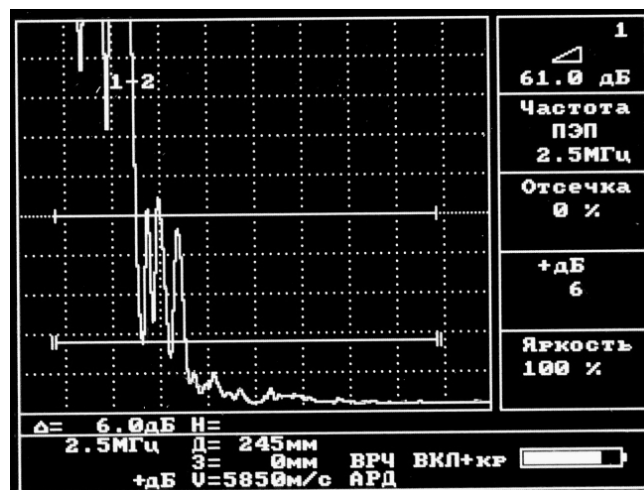


Рис. 5. Фото экрана ультразвукового дефектоскопа УД 2-70, настроенного с чувствительностью поиска

Fig. 5. Screen picture of ultrasonic flaw detector UD2-70 adjusted from sensitivity search

Коэффициент усиления ультразвукового дефектоскопа, дБ	
$20 \lg \left(\frac{S_a S_b}{\lambda^2 (D-20)^2} \left(\frac{10^{\frac{N_d}{20}} 2\lambda D}{S_a} \right)^{1-\frac{20}{D}} \right)$	
Диапазон ультразвукового дефектоскопа, мм	
$D + 10$	
Координата маркера ВРЧ, мм	Уровень ВРЧ, дБ
$D - 20$	0
$0,75D - 10$	$20 \lg \left(\frac{(D-20)^2}{(0,75D-10)^2} \left(\frac{10^{\frac{N_d}{20}} 2\lambda D}{S_a} \right)^{\frac{10}{D}-0,25} \right)$
$D/2$	$20 \lg \left(\frac{(D-20)^2}{(D/2)^2} \left(\frac{10^{\frac{N_d}{20}} 2\lambda D}{S_a} \right)^{\frac{20}{D}-0,5} \right)$
$0,25D + 10$	$20 \lg \left(\frac{(D-20)^2}{(0,25D+10)^2} \left(\frac{10^{\frac{N_d}{20}} 2\lambda D}{S_a} \right)^{\frac{30}{D}-0,75} \right)$
20	$20 \lg \left(\frac{(D-20)^2}{400} \left(\frac{10^{\frac{N_d}{20}} 2\lambda D}{S_a} \right)^{\frac{40}{D}-1} \right)$

Рис. 6. Аналитические зависимости для настройки функции ВРЧ ультразвукового дефектоскопа при ультразвуковом контроле осей колесных пар подвижного состава железных дорог

Fig. 6. Analytical dependence for setting function of difference-frequency wave for ultrasonic flaw detector during ultrasonic inspection of wheelset axles of railway rolling stock

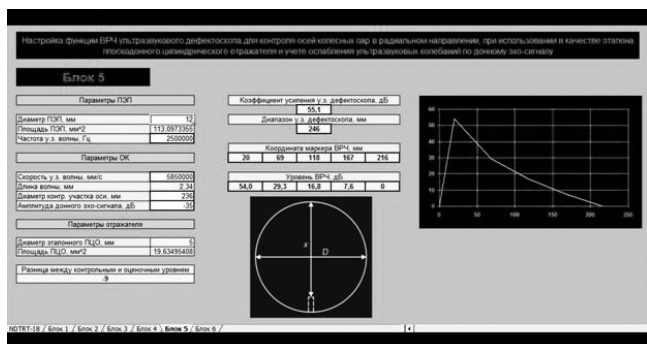


Рис. 7. Окно «Блок 5» программного продукта «NDTRT-18»

Fig. 7. The window "Block 5" of "NDTRT-18" software

Разница между контрольным и оценочным уровнями находится из выражения

$$\Delta N = 20 \lg \left(\frac{S_{b-3}}{S_{b-5}} \right) = 20 \lg \left(\frac{7,069}{19,635} \right) = -8,873 \text{ дБ} \approx -9 \text{ дБ}, \quad (5)$$

где S_{b-3} — площадь плоскодонного цилиндрического отражателя диаметром 3 мм, мм²; S_{b-5} — площадь плоскодонного цилиндрического отражателя диаметром 5 мм, мм².

Для автоматизации расчетов при настройке функции ВРЧ ультразвукового дефектоскопа при контроле осей колесных пар в радиальном направлении был разработан программный продукт «NDTRT-18» (Блок 5).

Окно программного продукта «NDTRT-18» — (Блок 5) представлено на рис. 7.

Программный продукт «NDTRT-18» устанавливается на персональный компьютер или планшет. Настройка функции ВРЧ ультразвукового дефектоскопа при контроле осей колесных пар в радиальном направлении при помощи программного продукта «NDTRT-18» (Блок 5) осуществляется следующим образом:

- на контролируемом участке оси измеряется амплитуда донного эхо-сигнала (на бездефектном участке);
- в окно (Блок 5) программного продукта «NDTRT-18» вводятся следующие данные: диаметр контролируемого участка оси, мм; диаметр пьезоэлектрического преобразователя, мм; частота ультразвуковой волны, Гц; скорость ультразвуковой волны в объекте контроля, мм/с; амплитуда донного эхо-сигнала, дБ;
- программный продукт «NDTRT-18» (Блок 5) рассчитывает параметры настройки функции ВРЧ ультразвукового дефектоскопа: коэффициент усиления ультразвукового дефектоскопа, дБ; диапазон ультразвукового дефектоскопа, мм; разницу между контрольным и оценочным уровнем, дБ; координаты маркера ВРЧ, мм; уровень ВРЧ для разных координат, дБ; также выводится приблизительный вид кривой ВРЧ, который должен получиться на экране дефектоскопа;

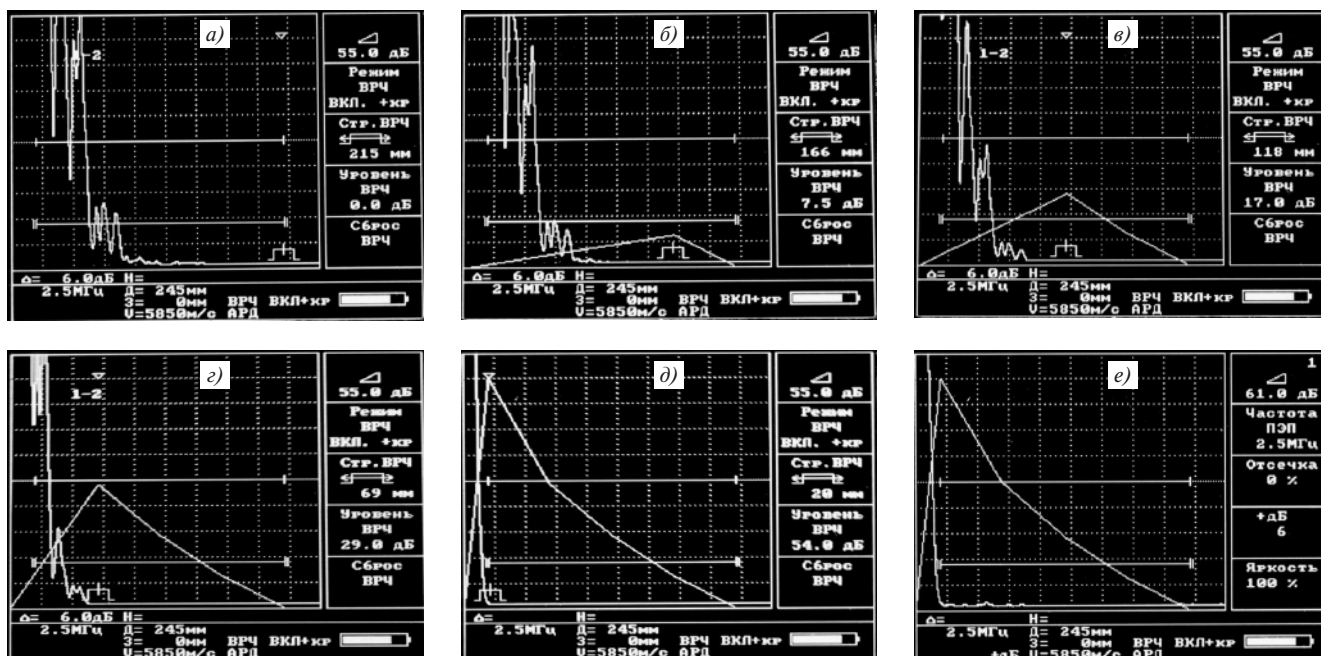


Рис. 8. Фото экранов ультразвукового дефектоскопа УД 2-70 при настройке функции ВРЧ, при координатах маркера ВРЧ:

а — 215 мм; б — 166 мм; в — 188 мм; г — 69 мм; д — 20 мм; е — режим контроля (чувствительность поиска)

Fig. 8. Picture screens of ultrasonic flaw detector UD2-70 when adjusting difference- frequency wave function, at the marker coordinate of difference- frequency wave:

а — 215 mm; б — 166 mm; в — 188 mm; г — 69 mm; д — 20 mm; е — control mode (search sensitivity)

• на ультразвуковом дефектоскопе выставляются следующие данные:

1) диапазон контроля;
2) коэффициент усиления;
3) параметры строба 1 (отмечается оценочный уровень): начало строба 20 мм, длина строба D —40 мм, где D —диаметр контролируемого участка; уровень строба 0,0 дБ;

4) параметры строба 2 (отмечается контрольный уровень): начало строба 20 мм, длина строба D —40 мм; уровень строба –9,0 дБ;

5) дальше идет настройка функции ВРЧ: вначале выставляется координата маркера ВРЧ, находящегося на максимальной глубине в контролируемом диапазоне, и выставляется рассчитанный программным продуктом уровень ВРЧ, и так далее справа налево.

На рис. 8 представлены фото экрана ультразвукового дефектоскопа УД 2-70 при настройке функции ВРЧ разработанным безэталонным методом для контроля подступичной части локомотивной оси диаметром 235 мм (амплитуда донного сигнала—35 дБ). Первым стробом отмечен оценочный уровень, вторым—контрольный.

Выводы. 1. Разработан безэталонный метод настройки чувствительности ультразвуковой аппаратуры и оценки допустимости несплошностей при ультразвуковом контроле осей колесных пар подвижного состава железных дорог эхоимпульсным акустическим методом.

2. Предлагаемый метод позволяет повысить достоверность результатов ультразвукового контроля за счет исключения недостатков применения стандартных образцов предприятия при настройке чувствительности и оценке допустимости несплошностей.

3. Созданный программный продукт «NDTRT-18» (Блок 5) позволяет автоматизировать расчеты для настройки функции ВРЧ ультразвукового дефектоскопа при контроле осей колесных пар подвижного состава железных дорог.

4. Безэталонный метод и программный продукт «NDTRT-18» успешно внедрены в ПАО «Лугансктепловоз» в технологический процесс ультразвукового контроля осей колесных пар магистральных тепловозов 2ТЭ116У, 3ТЭ116У, 2ТЭ116УД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бервинов В.И., Доронин Е.Ю., Зенин И.П. Техническое диагностирование и неразрушающий контроль деталей и узлов локомотивов. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 332 с.
2. Гаврилюк А.Ф., Рябец Т.А. Состояние и анализ безопасности движения на железных дорогах Украины. Пути развития средств НК // Неразрушающий контроль. 2008. № 2. С. 13—21.
3. Капранов Б.И., Коротков М.М. Акустические методы контроля и диагностики: учебное пособие. Ч. 1. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 186 с.
4. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. Изд. 2-е, испр. и доп. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
5. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах. Т. 3: Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
6. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / пер. с англ. М.: Наука, 1978. 544 с.
7. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1965. 391 с.
8. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник / пер. с нем. Е. К. Бухмана, Л. С. Зенковой; под ред. В. Н. Волченко. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
9. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
10. Киреев А.Н. Дефектометрия при ручном контроле элементов и систем подвижного состава железных дорог ультразвуковым эхо-методом // Вестник РГУПС. 2015. № 2. С. 24—30.
11. Киреев А.М. Наукові основи та практична реалізація вдосконалення ультразвукового контролю елементів та систем рухомого складу залізниць. Луганськ: Вид-во «Ноулдж», 2012. 142 с.
12. Повышение достоверности диагностической операции ультразвукового контроля осей колесных пар / Г.Г. Басов [и др.] // Ресурсосберегающие технологии производства и обработка давлением материалов в машиностроении: сборник научных трудов. Луганск, 2008. С. 292—299.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КИРЕЕВ Андрей Николаевич, канд. техн. наук, начальник центральной заводской лаборатории ПАО «Лугансктепловоз»; доцент кафедры железнодорожного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля

ВИТРЕНКО Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, проректор по науке Луганского государственного университета имени Владимира Даля

Статья поступила в редакцию 6.11.2015 г., актуализирована 4.12.2015 г., принята к публикации 30.12.2015 г.

Improvement of ultrasonic inspection of wheelset axles of railway rolling stock

A. N. KIREEV^{1,2}, V. A. VITRENKO²

¹Public Joint Stock Company "Luganskteplovoz", Lugansk, 91005, Ukraine

²Lugansk State University named after Vladimir Dal, State educational institution of higher education, Lugansk, 91034, Ukraine

Abstract. The article set the task of improving the ultrasonic inspection of wheelset axles of railway rolling stock by increasing the reliability of the inspection results.

Taken into account the specificity of the wheelset axles production defects, which may occur in it due to failures in technological processes of production, located mainly near the center of the axis and extend along the axis. Such defects are gained more complete identification as a result of the ultrasonic inspection with pulse-echo method on cylindrical side with direct converter in radial direction.

During ultrasonic inspection of axles on the cylindrical side in the radial direction sensitivity setting and evaluation of the permissibility of defects is performed on standardized samples of the enterprise with standard reflectors located at different depths in the inspection range. Cylindrical flat bottom 5 mm diameter reflectors are used as reference reflector, to adjust the estimated level of sensitivity, and 3 mm for adjusting the reference sensitivity level. The main disadvantage of the use of standard samples of the enterprise is the possible non-conformity of standard reflectors with technical requirements, such as the lack of parallelism of tangent plane of the flat bottom of the reflector to the entry point of the ultrasonic wave; lack of flatness of the bottom of the reference reflector; increased roughness of the flat bottom of the reference reflector, and others. The mismatch data results in decrease of the amplitude of echoes from the reference reflector, which leads to inaccurate assessment of defects in the inspected axis.

To eliminate the disadvantages of standard enterprise samples more reasonable is to make a transition to the assessment of defects by the use of charts amplitude-distance-diameter, built on the use of analytical dependencies describing the amplitude of the ultrasonic echo signal from different reflective surfaces. However, the application of the graphs method amplitude-distance-diameter leads to an increased amount of noises during the process of ultrasonic inspection at the beginning of the inspected range of flaw-detection.

The paper presents a mathematical apparatus and on its basis a standardless method for the setting of time function is developed to adjust the sensitivity of the ultrasonic flaw detector during the inspection of wheelset axes of railway rolling stock, allowing to exclude disadvantages of application of standard samples of the enterprise during the control and the diagram method the amplitude-distance-diameter, and accordingly, increase the reliability of the results of ultrasonic testing.

To automate the calculation when setting up the time function to adjust the sensitivity of the ultrasonic flaw detector the software "NDTRT-18" was designed (Unit 5).

A method for time setting to adjust the sensitivity of the ultrasonic flaw detector with developed standardless method and software product "NDTRT-18" was described.

Results of the practical setting the time function to adjust the sensitivity of the ultrasonic flaw detector UD 2 – 70 with using developed standardless method for ultrasonic inspection of the locomotive wheel seat axis of 235 mm diameter were presented.

Developed standardless method and software were implemented in the public joint stock company "Luganskteplovoz" into the process of inspection of wheelset axles of diesel locomotives 2TE116U, 3TE116U, 2TE116UD with ultrasonic pulse-echo method.

Keywords: railway rolling stock; the wheelset axle; technical diagnostics; nondestructive testing; ultrasonic testing; echo pulse method; time sensitivity adjustment

■ E-mail: lifter_23@mail.ru (A. N. Kireev)

REFERENCES

1. Bervinov V.I., Doronin E.Yu., Zenin I.P. *Tekhnicheskoye diagnostirovaniye i nerazrushayushchiy kontrol' de-taley i uzlov lokomotivov* [Technical diagnostics and non-destructive testing of parts and components of locomotives]. Moscow, GOU "Training Center for education on railway transport" Publ., 2008, 332 p.
2. Gavriluk A. F., Ryabets T. A. *Sostoyaniye i analiz bezopasnosti dvizheniya na zheleznykh dorogakh Ukrainy. Puti razvitiya sredstv NK* [Status and analysis of traffic safety on the railways of Ukraine. Ways of development of NDT]. *Nerazrushayushchiy kontrol'*, 2008, no. 2, pp. 13 – 21.
3. Kapranov B. I., Korotkov M. M. *Akusticheskiye metody kontrolya i diagnostiki* [Acoustic methods of control and diagnostics]. Tomsk, TPK Publ., 2008, 186 p.
4. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika* [Nondestructive testing and diagnostics. Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 656 p.
5. Ermolov I. N., Lange Yu. V., Klyuev V. V. *Ul'trazvukovoy kontrol'* [Ultrasonic testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004, vol. 3, 864 p.
6. Truell R., Elbaum Ch., Chik B. *Ultrasonic methods in solid state physics* [transl. from English]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 340 p.
7. Shraiber D. S. *Ul'trazvukovyye metody v fizike tverdogo tela* [Ultrasonic flaw detection]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1965, 391 p.
8. Krautkremer Yozef, Gerbert Krautkremer. *Ul'trazvukovoy kontrol' materialov* [Ultrasonic testing of materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991, 752 p.
9. Ermolov I. N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya* [Theory and practice of ultrasonic testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 240 p.
10. Kireev A. N. *Defektometriya pri ruchnom kontrole elementov i sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog ul'trazvukovym ekho-metodom* [Defectometry with manual control of elements and railway rolling stock systems with ultrasonic echo method]. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2015, no. 2, pp. 24 – 30.
11. Kireev A. M. *Naukovі osnovi ta praktichna realizatsiya vdoskonalennya ul'trazvukovogo kontrolyu elementiv ta sistem rukhomogo skladu zaliznits* [Scientific bases and practical realization of the perfection of ultrasonic testing of components and systems of railway rolling stock]. Lugansk, Noulidzh Publ., 2012, 142 p. (in Ukr.).
12. Basov G. G., Kireev A. N., Mozheyko A. V., Kireeva M. A. *Povyshenie dostovernosti diagnosticheskoy operatsii ul'trazvukovogo kontrolya osey kolesnykh par. Resursoberegayushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotka davleniem materialov v mashinostroenii*. Sb. nauch. tr. [Increasing the reliability of diagnostic operation of ultrasonic test-ing of wheelset axles. Resource saving technologies of production and pressure processing of materials in mechanical engineering. Coll. sci. works]. Lugansk, SNU im. V. Dala Publ., 2008, pp. 292 – 299.

ABOUT THE AUTHORS

KIREEV Andrey Nikolaevich,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the central laboratory of Public Joint Stock Company "Luganskteplovoz"; Associate Professor of Department of Railway Transport, Lugansk State University named after Vladimir Dal

VITRENKO Vladimir Alekseevich,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Science, Lugansk State University named after Vladimir Dal, State educational institution of higher education

Received 6.11.2015

Revised 4.12.2015

Accepted 30.12.2015

УДК 656.21.001.2

Пример расчета времени, скорости и пути торможения вагона на участке второй тормозной позиции сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины

Х. Т. ТУРАНОВ, А. А. ГОРДИЕНКО

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, 620034, Россия

Аннотация. В статье выполнен расчет времени, скорости и пути торможения вагона при его движении с замедлением на участке второй тормозной позиции горки при вариации времени торможения. Построены графические зависимости скорости и пути торможения вагона от времени движения. Объединяя построенные графические зависимости, найдены конкретные значения времени, скорости скольжения и пути торможения вагона на участке второй тормозной позиции горки.

Ключевые слова: сортировочная горка; вагон; встречный ветер; время; скорость и путь торможения вагона; движение вагона с замедлением на участке второй тормозной позиции

Актуальность проблемы. До настоящего времени в литературных источниках, например в [1, 2], посвященных решению проблемы проектирования сортировочной горки, встречаются существенные ошибки из-за неверного, на наш взгляд, толкования классических положений теоретической механики. В [1] удельное сопротивление воздушной среды и ветра $w_{\text{св}}$ определено по эмпирической формуле

$$w = \frac{17,8 C_x S (v - v_{\text{в}})^2}{Q(273 - t)}, \quad (1)$$

где 17,8 — постоянный коэффициент; C_x — коэффициент аэродинамических свойств отцепа, зависящий от угла между результирующим вектором относительной скорости и направлением движения отцепа; S — лобовая поверхность отцепа, м^2 ; v — скорость отцепа, м/с ; $v_{\text{в}}$ — скорость встречного ветра, м/с ; Q — вес отцепа, т (вместо силы тяжести тс); $(273 - t)$ — величина, учитывающая температуру окружающей среды, К .

Однако в (1) скорость отцепа v , к сожалению, является неизвестной величиной, подлежащей определению [3]. Именно поэтому выражение (1) является, на наш взгляд, ошибочным, не имеющим теоретической базы, поскольку сделана попытка найти неизвестное $w_{\text{св}}$ от неизвестного v , т. е. $w_{\text{св}} = f(v)$, где v — скорость скатывания вагона по уклону горки, которая определена в [1, 2, 4] по формуле свободно падающего тела

(т. е. по формуле Галилея $v = \sqrt{2g'h}$, где h и g' — высота падения, м , и величины ускорения свободного падения тел с учетом инерции вращающихся частей (колесных пар), м/с^2), что является недопустимым, поскольку при вертикальном падении вагона и речи не должно быть об учете инерции вращающихся частей (колесных пар), не говоря уже о невозможности вертикального падения вагона при его движении по уклону горки. Графически это можно представить так, как показано на рис. 1.

Принятие за основу теории скатывания вагона его движение по вертикали как свободно падающего тела в принципе не вписывается в положения классической механики, потому и является, по нашему предположению, существенной ошибкой, допущенной в [1, 2, 4].

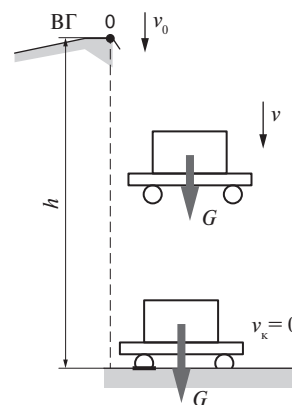


Рис. 1. Движение вагона по вертикали как свободно падающего тела:

ВГ — вершина горки; v_0 — начальная скорость вагона (или скорость надвига вагона); v — скорость падения вагона по вертикали (якобы заменяющая «скорость скатывания вагона по уклону горки» [1, 2, 4]); G — сила тяжести вагона с грузом; v_k — скорость вагона в конце соударения

Fig. 1. The movement of the car vertically as a free falling body: ВГ — top of the hump; v_0 — initial car speed (or speed of humping); v — speed of vertically falling car (as replacing “sliding speed of car by hump slope” [1, 2, 4]); G — gravity force of car with the load; v_k — car speed at the end of collision

■ E-mail: khturanov@yandex.ru (Х. Т. Туранов)

Исходя из этого, отметим, что в [1] также ошибочными являются формулы (4.5), (5.1); (5.11), (5.3) и (5.13), где h_0 определено с учетом ускорения вращающихся частей вагона в виде $h_0 = \frac{v_0^2}{2g'}$, что в принципе недопустимо [3]). К сожалению, все отмеченные формулы в [1] также стали уже классическими при проектировании сортировочных горок.

С учетом вышеизложенного необходимо отметить, что некорректные результаты таких исследований противоречат теории движения тела по наклонной плоскости. Вместе с тем именно эти некорректные результаты составляют основу теории расчетов при проектировании сортировочной горки в нормах проектирования [1], в исследовательских работах и в учебниках и учебных пособиях для студентов вузов железнодорожного транспорта (например, [2]).

Обобщая отмеченные недостатки существующей теории скатывания вагона по уклону сортировочной горки, можно отметить, что разработка упрощенного подхода к расчету и проектированию горки, а также программы ее расчета является научной проблемой в отрасли железнодорожного транспорта.

При этом уточненная математическая модель сортировочной горки, позволяющая определить точную скорость скатывания вагона на ее определенном участке, будет способствовать более точному определению параметров профиля горки и должна в последующем составлять основу теории скатывания вагона с сортировочной горки.

В связи с этим результаты исследований, выполненных в настоящей статье и посвященных, например, расчету участка второй тормозной позиции горки с использованием основополагающих принципов классической механики, на наш взгляд, подтверждают их актуальность для железнодорожного транспорта.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных расчету сортировочной горки по предлагаемой нами методике [3, 5 – 9], в настоящее время отсутствуют результаты вычислительных экспериментов по расчету времени, скорости и пути торможения вагона на участке второй тормозной позиции (далее — 2ТП горки) при воздействии встречного ветра малой величины.

Данная работа является продолжением серии публикаций по динамике скатывания вагона по уклону сортировочной горки [3, 5 – 9]. Отметим, что в статье будут использованы основные положения ранее предложенной методики расчетов времени, скорости скольжения и пути торможения вагона на участке 1ТП сортировочной горки при воздействии попутного ветра, изложенной в [8]. Вместе с тем здесь впервые будут изложены оригинальные результаты исследований движения вагона на участке 2ТП горки при воздействии встречного ветра, где неизвестными являются

три различных по размерности параметра — время, скорость скольжения и путь торможения вагона.

Научная гипотеза. Предполагаем, что на участке тормозной позиции сортировочной горки время, скорость скольжения и путь торможения вагона могут быть определены лишь на основе составления силовых соотношений [8, 9], которые имеют место в системе вагон — путь на исследуемом участке горки при воздействии встречного ветра малой величины и которые позволяют найти ускорение вагона, без которого немислимо определение времени, скорости и пути торможения вагона.

План решения проблемы определения скорости скольжения вагона на участке тормозной позиции. Во-первых, по известной величине начальной скорости $v_{02т}$ и вычисленным значениям ускорения вагона $a_{2т}$ при его движении с замедлением должен быть выполнен расчет скорости $v_{e2т}(t_{2т})$ и пути торможения вагона $x_{2т}(t_{2т}) = l_{2т}$ при вариации времени $t_{2т}$, и, во-вторых, объединяя их, можно найти рациональное значение времени торможения вагона $t_{2т}$ на исследуемом участке горки. Рассчитанные параметры движения вагона должны способствовать обеспечению безопасного движения вагона от вершины горки до ее расчетной точки.

Общий подход к решению задачи определения скорости и пути торможения вагона на участке 2ТП горки при воздействии встречного ветра. Общий подход к решению задачи при движении вагона на участке 2ТП горки при воздействии встречного ветра аналогичен [8, 9]. Тем не менее отметим некоторые отличия.

1. Пусть вагон после промежуточного участка сортировочной горки входит на участок 2ТП горки с заданной начальной скоростью $v_{02т}$. При скатывании одиночного вагона на участок 2ТП горки считаем, что вагон будет испытывать воздействие в основном внешних сил — силы тяжести вагона с грузом G , проекции силы аэродинамического сопротивления встречного ветра малой величины (например, юго-восточного или северо-восточного направления) F_{rv} по продольной оси Ox и поперечной оси Oy в виде F_{rvx} и F_{rvy} , т. е. $(\bar{F}_{rvx}, \bar{F}_{rvy}) \in \bar{F}_{rv}$.

2. Как и ранее [8, 9], допускаем, что на вагон будут воздействовать также силы трения скольжения колес о поверхности катания рельсовых нитей $F_{\tau} = F_{\tau, \text{ск}}$, силы торможения тормозной шины вагонного замедлителя $F_{\text{торм}}$ и силы трения скольжения гребней колес о боковые поверхности рельсовой нити $F_{\text{трб}}$ при учете воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{rvy} = F_{rv, \text{б}}$, а также силы сопротивления всякого рода (среды, снега и иная) F_c .

3. В соответствии с этим упрощенная расчетная модель движения вагона на участке 2ТП горки согласно принципу освобожденности от связей теоретической механики [10] представлена на рис. 2 [8].

На рис. 2 обозначено: O — начало подвижной системы координат Ox_1yz , жестко связанной с вагоном; Ox — ось по горизонтали; ψ_{05} — угол уклона (спуска) участка 2ТП горки; $v_{\text{вх}}$ — относительная скорость воздуха; $v_0 = v_{\text{вх}1} = v_{01\tau}$ — начальная скорость вагона; $v_{\text{в}}$ — скорость вагона; $F_{\text{с}} = F_{\text{ср}}$ — сила сопротивления среды; N и $F_{\text{тр.х}}$ — нормальная и касательная составляющие реакции связей (рельсовых нитей). Причем $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ и $F_{\text{тр.х}} = F_{\text{тр.х}1} + F_{\text{тр.х}2} + F_{\text{тр.х}3} + F_{\text{тр.х}4}$ как параллельные силы.

Здесь $F_{\text{тр.х}}$ учитывает трение скольжения колес о поверхность катания рельсовых нитей $F_{\text{тр.ск}}$, трение скольжения гребней колес по боковым поверхностям рельсовых нитей $F_{\text{тр.б}}$ вследствие воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{\text{вб}} = F_{\text{вб}}$, трение скольжения обода колес о сжатые тормозные шины вагонного замедлителя $F_{\text{торм}}$, т. е. $F_{\text{тр.х}} = F_{\text{т}} + F_{\text{торм}}$ с учетом того, что в ней $F_{\text{т}} = F_{\text{тр.ск}} + F_{\text{тр.б}}$. Иначе, $F_{\text{тр.х}} = F_{\text{тр.ск}} + F_{\text{тр.б}} + F_{\text{торм}}$.

Последовательность расчета скорости и пути торможения вагона на участке 2ТП горки при воздействии встречного ветра. Рассмотрим случай проектирования горочной горловины на 24 пути. Пусть исходными данными задачи являются: угол уклона участка 2ТП горки — $\psi_{05} = 10\%$, или 0,001 рад; длина участка 2ТП горки — $l_{2\tau} = 31$ м [11]; масса вагона с грузом без учета инерции вращающихся масс — $M_0 = 8,094 \cdot 10^4$ (а с учетом инерции этих масс $M = 9,256 \cdot 10^4$), кг; сила тяжести вагона с грузом без учета инерции вращающихся масс $G = 794$ кН (а с учетом инерции этих масс $G = 908$ кН); начальная скорость вагона (скорость входа вагона на участок 2ТП горки) при учете только сопротивления среды $F_{\text{с}} - v_{02\tau} = 4,835$ м/с; начальная скорость вагона с учетом сопротивления среды $F_{\text{с}}$ и проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{\text{вб}} - v_{021\tau} = 4,143$ м/с.

Последовательность расчета времени, скорости скольжения и пути торможения вагона на участке 2ТП сортировочной горки при воздействии встречного ветра аналогична [8, 9]. Так, например, по значению силы $F_{2\tau}$ (или $F_{2\tau1}$), способствующей замедленному движению вагона, и массы вагона M_0 без учета инерции вращающихся частей находят ускорение вагона $a_{2\tau}$ (или $a_{2\tau1}$) при движении на участке 2ТП горки с замедлением при воздействии сопротивления среды $F_{\text{с}}$ и при одновременном воздействии $F_{\text{с}}$ и проекции встречного ветра на боковую сторону вагона $F_{\text{вб}}$ (см. формулу (10) [8]), м/с²:

$$a_{2\tau} = \frac{|F_{2\tau}| \cdot 10^{-3}}{M_0}. \quad (2)$$

Например, если $F_{2\tau} = -160,984$ и $F_{2\tau1} = -163,72$ кН, $M_0 = 8,094 \cdot 10^4$ — масса вагона с грузом без учета инерции вращающихся масс (а с учетом инерции этих масс $M = 9,256 \cdot 10^4$), кг, то $a_{2\tau} = 1,989$ и $a_{2\tau1} = 2,023$ м/с².

Далее, изменяя время торможения вагона $t_{1\tau}$ (например, до $t_{1\tau} = 2,2$ с), определяют скорость

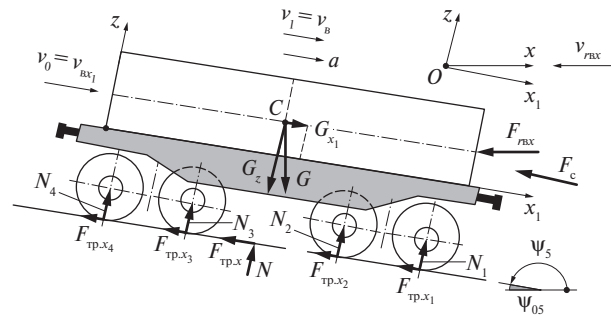


Рис. 2. Упрощенная расчетная модель движения вагона по профилю 2ТП горки при воздействии встречного ветра
Fig. 2. Simplified calculation model of car movement on TP 2 profile of the hump under the influence of crosswinds

скольжения вагона при выходе из участка 2ТП горки $v_e(t_{2\tau}) = v_e(t_{\tau})$ по классической формуле элементарной физики, м/с

$$v_e(t_{\tau}) = v_{02\tau} - a_{2\tau} t_{\tau}, \quad (3)$$

где $v_{02\tau}$ — начальная скорость вагона (скорость входа вагона на участок 2ТП горки (например, $v_{02\tau} = 4,835$), м/с.

Например, если $v_{02\tau} = 4,835$ м/с — начальная скорость вагона с учетом сопротивления среды $F_{\text{с}}$, $v_{021\tau} = 4,143$ м/с — начальная скорость вагона с учетом сопротивления среды $F_{\text{с}}$ и проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{\text{вб}}$, $M_0 = 8,094 \cdot 10^4$ — масса вагона с грузом без учета инерции вращающихся масс, кг; $a_{2\tau} = 1,989$ и $a_{2\tau1} = 2,023$ м/с² и при $t_{2\tau} = 1,2$ с, то $v_{2\tau} = 2,448$ м/с (или 8,8 км/ч), $v_{2\tau1} = 1,716$ м/с (или 6,17 км/ч). Увеличивая время торможения в 2 раза, до $t_{2\tau} = 2,4$ с, можно получить $v_{e2\tau} = 0,061$ и $v_{e2\tau1} = -0,712$ м/с, что соответствует полной остановке вагона на рассматриваемом участке горки.

Отметим, что с использованием выражения (3) можно построить графическую зависимость скорости $v_{\text{ет}}(t)$ от времени движения вагона t на рассматриваемом участке сортировочной горки.

Определяют путь торможения вагона $x_{2\tau}(t_{2\tau}) = l_{2\tau} = l_{\tau}$ в момент времени $t_{2\tau} = 1,2$ с, м,

$$l_{\tau} = v_{02\tau} t_{\tau} - \frac{1}{2} a_{2\tau} t_{\tau}^2. \quad (4)$$

Например, если $v_{02\tau} = 4,835$, $v_{021\tau} = 4,143$ и $v_{021\tau} = 4,143$ м/с, $a_{2\tau} = 1,989$ и $a_{2\tau1} = 2,023$ м/с², $t_{2\tau} = 1,2$ с, то путь торможения $x_{2\tau}(t_{2\tau}) = l_{2\tau} = 4,37$, $x_{2\tau1}(t_{2\tau}) = l_{2\tau1} = 3,515$ и $x_{2\tau2}(t_{2\tau}) = l_{2\tau2} = 3,845$ м. Увеличивая время торможения до $t_{2\tau} = 2,2$ с, можно получить следующие значения пути торможения $x_{2\tau}(t_{2\tau}) = l_{2\tau} = 5,876$, $x_{2\tau1}(t_{2\tau}) = l_{2\tau1} = 4,118$ и $x_{2\tau2}(t_{2\tau}) = l_{2\tau2} = 4,778$ м, при которых произойдет полная остановка вагона.

Построение графических зависимостей скорости и пути торможения вагона от времени на участке 2ТП горки. Ниже приведены результаты вычислений времени, скорости скольжения и пути торможения вагона

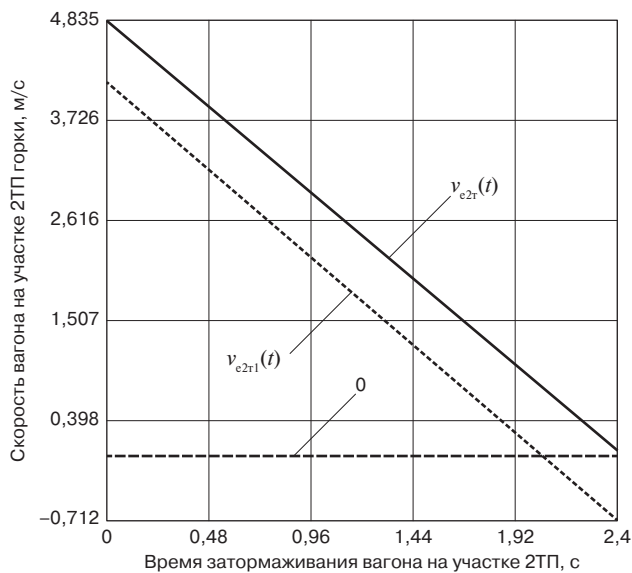


Рис. 3. Графическая зависимость скорости скольжения вагона на участке 2ТП горки от времени движения (до 2,2 с)

Fig. 3. Graphical dependence of the car sliding speed at the site 2TP of the hump from the time of motion (up to 2.2 sec)

от времени на участке 2ТП горки, полученные в программе MathCAD [30].

Используя формулы (3) и (4), для примера покажем графические зависимости скорости скольжения и пути торможения вагона на участке 2ТП горки от времени торможения:

$t = 0, 0,1...2,4$ — изменение времени торможения вагона t на участке 2ТП горки, с;

$v_{e2}(t) = v_{02r} - a_{2r}t$ — скорость вагона $v(t)$ в любой момент времени t на участке 2ТП горки при воздействии только сопротивления среды F_c , м/с;

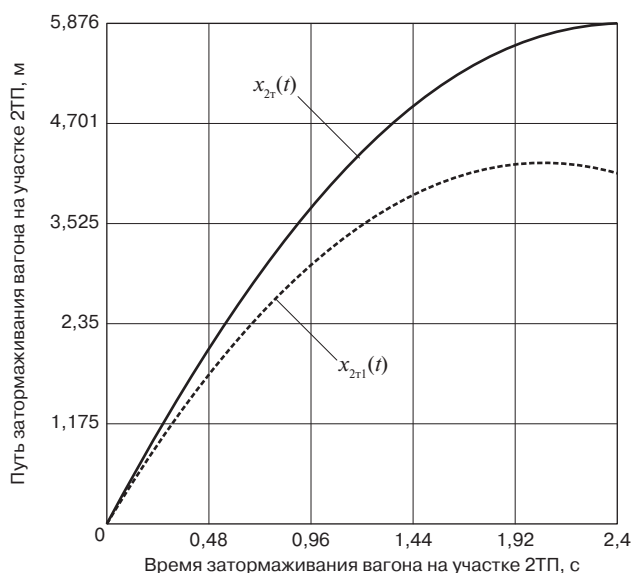


Рис. 4. Графическая зависимость пути торможения вагона по участку 2ТП горки от времени (до 2,4 с)

Fig. 4. Graphic dependence of the braking way of the car on the site 2TP of the hump from time (up to 2.4 sec)

$v_{e2r1}(t) = v_{02r1} - a_{2r1}t$ — скорость вагона $v(t)$ в любой момент времени t на участке 2ТП горки при воздействии сопротивления среды F_c с учетом воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{рв.6}$, м/с;

$x_{2r}(t) = v_{02r}t - (1/2)a_{2r}t^2$ — путь торможения вагона $x(t)$ в любой момент времени t на участке 2ТП горки при воздействии только сопротивления среды F_c , м;

$x_{2r1}(t) = v_{02r1}t - (1/2)a_{2r1}t^2$ — путь торможения вагона $x(t)$ в любой момент времени t на участке 2ТП горки при воздействии сопротивления среды F_c с учетом воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{рв.6}$, м.

Результаты вычислений представлены на рис. 3 и 4.

Как видно, графические зависимости $v(t)$ носят линейный, а $x(t)$ — нелинейный характер в соответствии с (3) и (4).

Анализ графической зависимости $v(t)$ показывает, что в течение времени $t = 1,2$ с скорость вагона с учетом только воздействия сопротивления среды (см. рис. 3) заметно уменьшается — с 4,835 м/с (это скорость входа вагона на участок 2ТП горки при учете сопротивления среды) до 2,448 м/с, т. е. до 1,4 м/с, а с учетом воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона $v(t_{2r1})$ также значительно уменьшается — с 4,143 м/с (это скорость входа вагона на участок 2ТП горки при учете сопротивления среды и проекции ветра на боковую сторону вагона) до 1,716 м/с, т. е. до 2,96 м/с.

Анализ графической зависимости $x(t)$ также показывает, что в течение времени $t_{2r} = 1,2$ с (см. рис. 4) путь торможения вагона при учете только воздействия сопротивления среды $l_{2r} = 3,47$ м, а с учетом воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{рв.6}$ это расстояние уменьшится незначительно, до $l_{2r} = 2,53$ м (т. е. на величину 0,94 м).

Также отметим, что анализ графических зависимостей на рис. 3 и 4 показывает, что скорость вагона $v(t_{2r})$ при t_{2r} до значения 2,4 с имеет отрицательное значение, а путь торможения практически не изменяется при учете только сопротивления среды, а с учетом других видов сопротивления (ветра) при $t = 2,2$ с — соответствует остановке вагона.

Особо оговоримся, что, используя графические зависимости скорости $v_c(t)$ и пути торможения $x(t)$ вагона от времени t , приведенные на рис. 3 и 4, и объединяя их, можно найти рациональное значение времени торможения вагона t_r на участке 2ТП горки (рис. 5).

Анализ построенных графических зависимостей на рис. 5 показывает, что, например, с учетом сопротивления среды при $t_r = 0,8$ с: $v(t_r) = 3,24$ м/с и $x(t_r) = l_r = 3,23$ м, а с учетом одновременно воздействия сопротивления среды и ветра при $t_r = 0,79$ с: $v(t_r) = 2,55$ м/с и $x(t_r) = l_r = 2,6$ м. Видно, что значения скорости и пути торможения как различных

физических параметров по величине практически совпадают, хотя имеют разные единицы измерения.

Таким образом, для заданных исходных данных задачи, если время срабатывания вагонного замедлителя $t_{\text{вк}} = 0,8$ с [27], то с момента его включения время торможения равно $t_{\text{зат}} = t_{\text{вк}} + t_{\text{т}} = 0,8 + 0,8 = 1,6$ с, а время полной остановки вагона — $t_{\text{зат}} = t_{\text{вк}} + t_{\text{т}} = 0,8 + 2,4 = 3,2$ с.

Выводы. 1. Ранее составленные нами силовые соотношения, имеющие место в системе вагон — путь и присущие только участку 2ТП сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины, позволили вычислить ускорение вагона с замедлением $a_{2\text{т}}$. Классические формулы пути и скорости тела способствовали определению неизвестных значений различных по размерности параметров — времени, скорости скольжения и пути торможения вагона на участке 2ТП горки при воздействии встречного ветра малой величины.

2. Графические зависимости скорости скольжения $v(t_{\text{т}})$ и пути торможения вагона $x(t_{\text{т}})$ от времени, построенные по известной величине начальной скорости вагона $v_{02\text{т}}$ и вычисленным значениям его ускорения с замедлением $a_{2\text{т}}$ при изменении времени торможения $t_{\text{т}}$, после их объединения позволили определить значение времени торможения вагона $t_{\text{зат}}$ на участке 2ТП горки с учетом времени срабатывания вагонного замедлителя $t_{\text{вк}}$.

3. Представленные результаты исследований могут быть использованы при вычислении времени движения и скорости скатывания вагона на последующих участках горки, а в дальнейшем для разработки программы расчета профиля сортировочной горки — от ее вершины до расчетной точки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М.: ТЕХИНФОРМ, 2003. 168 с.
2. Железнодорожные станции и узлы: учебник / В. И. Апатцев [и др.]; под ред. В. И. Апатцева и Ю. И. Ефименко. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 855 с.
3. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Некоторые проблемы теоретической предпосылки динамики скатывания вагона по уклону сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 3. С. 29–36.
4. Образцов В. Н. Станции и узлы. Ч. II. М.: Трансжелдориздат, 1938. 492 с.
5. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Аналитическое описание движения вагона на первом скоростном участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины // Транспорт Урала. 2015. № 2. С. 7–12.
6. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Пример расчета времени и скорости вагона при его движении по всей длине участка первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины // Известия ПГУПС. 2015. № 4. С. 64–71.
7. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Пример расчета времени и скорости вагона на втором скоростном участке сортировочной

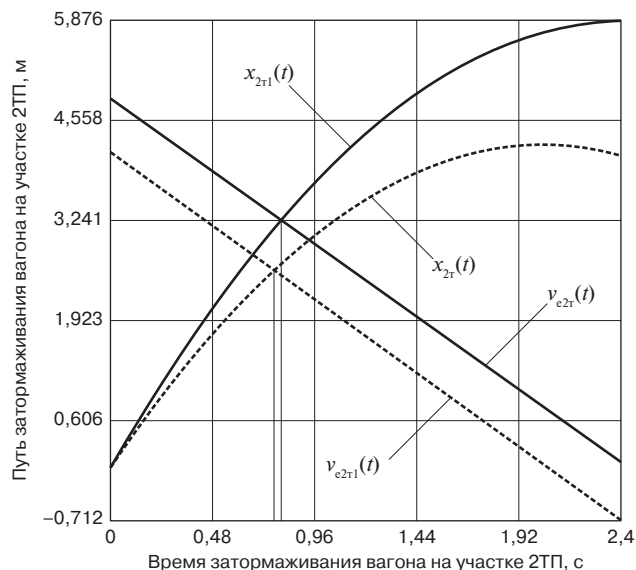


Рис. 5. Совмещенные графические зависимости скорости вагона (см. рис. 3) и пути торможения вагона (см. рис. 4) на участке 2ТП горки от времени

Fig. 5. Combined graphical dependencies of the car speed (see Fig. 3) and braking way of the car (see Fig. 4) at the site of 2TP of the hump from time

горки при воздействии встречного ветра малой величины по новой методике // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2015. № 3. С. 25–35.

8. Khabibulla Turanov, Andrey Gordienko and Irina Plakhotich. (2015). Simplified Analytical Description of Wagon Movement with Braking Action on the Marshalling Hump Section of the First Braking Position under the Impact of Fair Wind. Science and Technology, Vol. 5 No. 4, December 2015, pp. 57–62. e-ISSN: 2163–2677. ID: 104000150 doi: 10.5923/j.scit.2015.04.01.

9. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Пример расчета скорости вагона на участке первой тормозной позиции сортировочной горки с затормаживанием при воздействии попутного ветра // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 12. С. 29–35.

10. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. Т. II. Динамика. М.: Наука, 1983. 640 с.

11. Земблинов С. В., Страковский И. И. Альбом схем элементов станций и узлов. М.: Всесоюз. изд.-полиграф. объедин. МПС, 1963. 89 с.

12. Кирьянов Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 432 с.

13. Кобзев В. А. Технические средства сортировочных горок, обеспечивающие безопасность движения: Учебное пособие. Ч. 1. М.: МИИТ, 2009. 92 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ТУРАНОВ Хабибулла Туранович,

д-р техн. наук, профессор кафедры «Станции, узлы и грузовая работа», УрГУПС

ГОРДИЕНКО Андрей Александрович,

канд. техн. наук, ассистент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа», УрГУПС

Статья поступила в редакцию 28.12.2015 г., принята к публикации 9.03.2016 г.

An example of calculating time, speed and brake way of the car on the site of the second braking position at the hump yard under the influence of small crosswinds

Kh. T. TURANOV, A. A. GORDIENKO

Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, 620034, Russia

Abstract. To present day the speed of sliding car in the theory of calculation of marshalling hump determined by the formula of free falling body, where the acceleration of free falling bodies are given with the inertia of the wheelsets, which is unacceptable. Therefore, for the first time the movement of the car on the part of the second hump brake position of marshalling hump under the influence of the small crosswinds was studied. Force relations that take place in the system "car-railway track" on the second hump brake position under the influence of the cross-wind of the small value was given. These force relations include "shifting" (i.e. the projection of the gravity of the car with load and cross-wind on the direction of movement of the car) and "restraining" forces. By the difference between "shifting" and "restraining" forces and weight of the car without inertia of the rotating parts (wheel pairs) and with using the basic law of dynamics of a body with non-ideal constraints (D'Alembert' principle), acceleration of the car when driving in the second hump brake position under the influence of the cross-wind was calculated. Then, the braking time and the sliding speed of the car related to rail lines and braking tires of car retarders is determined by the classical formula for the track and speed of uniformly decelerated motion. On this basis, for the first time results of researching of car movement with acceleration in the second hump braking position is given. Graphic dependences of speed and the way of the car braking from the time of movement were built. By combining built graphic dependences rational time values of sliding speed and the braking way of the car were found. Presented results of researches can be used in the calculation of the motion time and speed of sliding of the car on the next parts of the hump, and in the future to complete development of the corrected program of calculation of the lowering part of a hump from its top to the estimated point.

Keywords: hump yard; car; crosswind; time; breaking speed and way; car movement with deceleration at the site of second braking position

REFERENCES

1. Rules and regulations of of designing marshalling devices on railways of 1520 mm gauge. Moscow, TEKhINFORM Publ., 2003, 168 p. (in Russ.).
2. Apattsev V.I., Efimenko Yu.I., Pravdin N.V. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and units]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2014, 855 p.
3. Turanov Kh.T., Gordienko A.A. *Nekotorye problemy teoreticheskoy predposylki dinamiki skatyvaniya vagona po uklonu sortirovochnoy gorki* [Some problems of theoretical background of the dynamics of the car rolling down the slope hump]. Byulleten' transportnoy informatsii, 2015, no.3, pp. 29 – 36.
4. Obratstov V.N. *Stantsii i uzly* [Stations and units]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1938, 492 p.
5. Turanov Kh.T., Gordienko A.A. *Analiticheskoe opisanie dvizheniya vagona na pervom skoro-rostnom uchastke sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii vstrechnogo vetra maloy velichiny*

[Analytical description of the car movement on the first section of speed hump when exposed to small crosswinds]. Transport Urala, 2015, no.2, pp. 7 – 12.

6. Turanov, Kh.T., Gordienko A.A. *Primer rascheta vremeni i skorosti vagona pri ego dvizhenii po vsey dline uchastka pervoy tormoznoy pozitsii sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii vstrechnogo vetra maloy* [Example of calculation of time and speed of the car as it moves along the entire length of the first section of the brake position of hump yard under the influence of a small crosswind]. Izvestiya PGUPS, 2014, no. 4, pp. 64 – 71.

7. Turanov Kh.T., Gordienko A.A. *Primer rascheta vremeni i skorosti vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii vstrechnogo vetra maloy velichiny po novoy metodike* [An example of time and speed calculation for the car at the second speed hump yard section under the influence of small crosswinds by a new method]. Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2015, no. 3, pp. 25 – 35.

8. Khabibulla Turanov, Andrey Gordienko and Irina Plakhotich. *Simplified Analytical Description of Wagon Movement with Braking Action on the Marshalling Hump Section of the First Braking Position under the Impact of Fair Wind*. Science and Technology, vol. 5 no. 4, December 2015, pp. 57 – 62. Doi: 10.5923/j.scit.201504.01.

9. Turanov Kh.T. Gordienko A.A., Plakhotich I.S. *Primer rascheta skorosti vagona na uchastke pervoy tormoznoy pozitsii sortirovochnoy gorki s zatormazhivaniem pri vozdeystvii poputnogo vetra* [Example of calculating the speed of the car at the site of the first braking position of hump yard with lockup under the influence of a favorable wind]. Byulleten' transportnoy informatsii, 2015, no.12, pp. 29 – 35.

10. Loytsyanskiy L.G., Lur'e A.I. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Course of the theoretical mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1983, vol. 2, 640 p.

11. Zemblinov S.V., Strakovskiy I.I. *Al'bom skhem elementov stantsiy i uzlov* [Album of schemes of elements of units and stations]. Moscow, Vsesoyuz. izd.poligraf. ob'edin. MPS Publ., 1963, 89 p.

12. Kiryanov D.V. *Mathcad 15*. Mathcad Prime 1.0. St.Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2012, 432 p.

13. Kobzev V.A. *Tekhnicheskiye sredstva sortirovochnykh gorok, obespechivayushchiye bezopasnost' dvizheniya* [Technical means of marshalling yards to ensure traffic safety]. Moscow, MIIT Publ., 2009, 92 p.

ABOUT THE AUTHORS

TURANOV Khabibulla Turanovich,

Dr. Sci. (Eng.), professor of department "Stations, units and loading operations", Ural State University of Railway Transport (USURT)

GORDIENKO Andrey Aleksandrovich,

Cand. Sci. (Eng.), assistant at the department "Stations, units and loading operations", Ural State University of Railway Transport (USURT)

Received 28.12.2015

Accepted 9.03.2016

■ E-mail: khturanov@yandex.ru (Kh. T. Turanov)