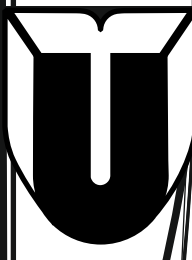


ISSN 1814-3520 (print)
ISSN 2500-1590 (online)

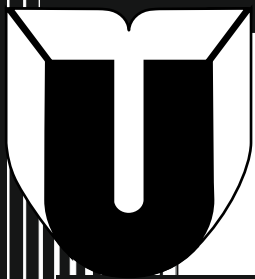
Том 22, № 1
2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018



Том 22, № 1

2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 22, № 1

2018

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Редакционная коллегия

СУСЛОВ К.В., кандидат технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)

НЕМЧИНОВА Н.В., доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)

АЗАРОВ В.Н., доктор технических наук, профессор Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета Высшей школы экономики (г. Москва, Россия)

БАЖИН В.Ю., доктор технических наук, декан факультета переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

БОРОВИКОВ Ю.С., доктор технических наук, проректор Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия)

ВОРОПАЙ Н.И., член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

ЗАЙДЕС С. А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

МАМЯЧЕНКОВ С.В., доктор технических наук, профессор Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

ПАНТЕЛЕЕВ В.И., доктор технических наук, профессор Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)

ПЕТРОВ А.В., доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

СИТНИК Л.Е., доктор-инженер, профессор, заведующий кафедрой Транспортной техники Вроцлавского политехнического университета (Польша)

СТЫЧИНСКИ С.А., профессор Университета Отто-фон-Герике (г. Магдебург, Германия)

ТИХОМИРОВ А.А., доктор экономических наук, профессор университета ИНХА (г. Инчон, Республика Корея)

ФЕДОТОВ А.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

ШОЛЬТЕС Бертхольт, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания – ежемесячно

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-62813 от 18 августа 2015 г.

Учредитель Иркутский национальный исследовательский технический университет

Подписной индекс в Каталоге
русской прессы – 38237

Адрес редакции:

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Д-119

e-mail: vestnik@istu.edu

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 1

2018

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

Editorial board

SUSLOV K.V., Candidate of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)

NEMCHINOVA N.V., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy of Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor in Chief (Irkutsk, Russia)

AZAROV V.N., Doctor of technical sciences, Professor of Moscow Institute of Electronics and Mathematics of Higher School of Economics National Research University (Moscow, Russia)

BAZHIN V.Y., Doctor of technical sciences, Dean of the Faculty of Mineral Raw Materials Processing of the St. Petersburg Mining University (Saint Petersburg Mining University) (Saint Petersburg, Russia)

BOROVNIKOV Y.S., Doctor of technical sciences, Pro-Rector of National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

VOROPAI N.I., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of technical sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Scientific Advisor of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (Irkutsk, Russia)

ZAIDES S.A., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Machine-Building Technologies and Materials of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

MAMYACHENKOV S.V., Doctor of technical sciences, Professor of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

PANTELEEV V.I., Doctor of technical sciences, Professor of Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

PETROV A.V., Doctor of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

SITNIK L.E., Doctor-Engineer, Professor, Head of the Department of Transport Technology of Wrocław University of Science and Technology (Poland)

STYCHINSKI S.A., Professor of the Otto von Guericke University (Magdeburg, Germany)

TIKHOMIROV A.A., Doctor of Economics, Professor of the INHA University (Incheon, Republic of Korea)

FEDOTOV A.I., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Transport of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

BERTHOLT SCHOLTES, Director of the Institute of Metallurgy of the University of Kassel (Kassel, Germany)

The Journal was founded in 1997
Frequency of publication – monthly

The journal is registered with the Federal Agency for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media (Roskomnadzor).

Certificate of registration № ПИ № ФС77-62813
of 18 August, 2015.

Founder: Irkutsk National Research Technical University

Subscription index in the Catalog
of the Russian Press – 38237

Address of the Publishers:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074
Office D-119
e-mail: vestnik@istu.edu

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- | | |
|--|----|
| ✿ Елисеев А.В., Орленко А.И. К вопросу о математическом моделировании режимов непрерывного подбрасывания щетки в контактных взаимодействиях с коллектором..... | 10 |
| ✿ Мельников А.П., Буглов Н.А. Влияние шероховатости проточной части струйного насоса на его характеристики..... | 23 |
| ✿ Нго Као Кыонг, Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка качества упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании роликами разных конструкций..... | 30 |
| ✿ Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г., Дюбанова И.Д., Тертова А.И., Чернышева А.А. Повышение производительности смесителей непрерывного действия с механизмом осцилляции..... | 38 |

Информатика, вычислительная техника и управление

- | | |
|---|-----|
| ✿ Волков Ю.В. Особенности получения диагностических параметров вибросигналов дизелей, записанных в цифровом виде..... | 47 |
| ✿ Гефан Г.Д., Базилевский М.П. Сопоставление дисперсионного и регрессионного подходов на примере анализа данных о движении городского транспорта..... | 58 |
| ✿ Ионикова Е.П., Шувалов В.П. Анализ методов обеспечения показателей надежности сетей PON и LR-PON. Часть I..... | 69 |
| ✿ Петров А.В. Метод генерирования двумерного бинарного случайного процесса..... | 89 |
| ✿ Попов А.А., Бобоев Ш.А. Получение разреженных решений методом LS-SVM через построение выборки с помощью методов оптимального планирования и внешних критериев качества моделей..... | 100 |
| ✿ Смирнов А.В., Хабибулин Р.Ш., Тараканов Д.В. Применение многоагентного подхода для поддержки управления безопасностью в техносфере..... | 118 |

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- **Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А.** Математическое моделирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора в среде MATLAB Simulink..... 134
- **Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С.** Пневмотранспортная установка для транспортирования мелкодисперсного материала..... 151
- **Дьяконов А.Г., Фаттахов Р.К.** Регулирование магнитного поля в перенастраиваемой магнетронной распылительной системе с мишенью конечных размеров..... 159
- **Фишов А.Г., Петрищев А.В., Сердюков О.В.** Идентификация классов состояния автономной системы энергоснабжения для управления режимом ее параллельной работы с централизованной электрической сетью..... 168



Металлургия и материаловедение



- **Бельский С.С.** Переработка вольфрамитового концентрата..... 186
- **Дударев В.И., Минаева Л.А., Филатова Е.Г., Саламатов В.И.** Электрокоагуляционное извлечение марганца из производственных вод обогатительного комбината..... 194



Транспорт



- **Дьяков Д.Е.** Способ буксировки воздушных судов с использованием малогабаритного буксировщика..... 202
- **Макаров И.Н.** Эффективность функционирования и развития транспортной системы крупного города и городской агломерации: критерии оптимизации, необходимость мультимодального взаимодействия..... 209
- **Фадеев А.И., Фомин Е.В.** Методика решения задачи определения оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования..... 218
- **Федюкович Г.И.** Контроль качества сварных соединений цистерн подвижного состава железнодорожного транспорта магнитографическим методом..... 228

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 1

2018

CONTENTS



Mechanical Engineering and Machine Science

- | | |
|--|----|
| ✉ Eliseev A.V., Orlenko A.I. On mathematical modeling of brush continuous gap-forming modes in contact interactions with commutator..... | 10 |
| ✉ Melnikov A.P., Buglov N.A. Effect of wet end roughness on jet pump characteristics..... | 23 |
| ✉ Ngo Cao Cuong, Zaides S.A., Le Hong Quang. Hardened layer quality evaluation at surface plastic deformation by rollers of different designs..... | 30 |
| ✉ Podgorny Yu.I., Skeebe V.Yu., Martynova T.G., Dyubanova I.D., Tertova A.I., Chernysheva A.A. Improving efficiency of continuous mixers with an oscillation mechanism..... | 38 |



Information Science, Computer Engineering and Management

- | | |
|---|-----|
| ✉ Volkov Yu.V. Features of obtaining digitally recorded diesel vibration signal diagnostic parameters..... | 47 |
| ✉ Gefan G.D., Bazilevsky M.P. Comparison of variance and regression approaches on example of urban traffic data analysis..... | 58 |
| ✉ Ionikova E.P., Shuvalov V.P. Analysis of methods ensuring PON and LR-PON network reliability indicators. Part I..... | 69 |
| ✉ Petrov A.V. Method of two-dimensional binary random process generation..... | 89 |
| ✉ Popov A.A., Boboev Sh.A. Obtaining sparse solutions by LS SVM method through sample construction by optimal experiment design method and model quality criteria..... | 100 |
| ✉ Smirnov A.V., Habibulin R.Sh., Tarakanov D.V. Use of multi-agent approach for technosphere safety management support..... | 118 |

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

CONTENTS



Power Engineering



- **Andreev M.V., Ruban N.Yu., Suvorov A.A.** Mathematical simulation of numerical transformer differential protection in MATLAB SIMULINK..... 134
- **Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S.** Pneumatic conveying installation for finely divided material transportation..... 151
- **Dyakonov A.G., Fattakhov R.K.** Magnetic field regulation in the retuned magnetron sputtering system with a target of final sizes..... 159
- **Fishov A.G., Petrishev A.V., Serdyukov O.V.** Identification of state classes of stand-alone power supply system to control its mode of parallel operation with centralized electrical network 168



Metallurgy and Materials Science



- **Belskii S.S.** Processing of wolframite concentrate..... 186
- **Dudarev V.I., Minaeva L.A., Filatova E.G., Salamatov V.I.** Electrocoagulation extraction of manganese from processing plant industrial water..... 194

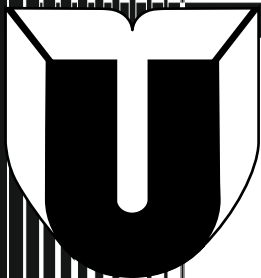


Transport



- **Diakov D.E., Velikanov A.V., Likhovidov D.V., Rachinsky O.V.** Method of aircraft towing using a small-sized tow..... 202
- **Makarov I.N.** Operation and development efficiency of large city and urban agglomeration transport system: optimization criteria, need for multimodal interaction..... 209
- **Fadeev A.I., Fomin E.V.** Problem-solving methods for determining optimal structure of municipal passenger transport fleet..... 218
- **Fedyukovich G.I.** Quality control of railway tank car welded joints by magnetographic method..... 228





ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию очередной выпуск научного журнала «Вестник Иркутского государственного технического университета».

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Минобрнауки России.

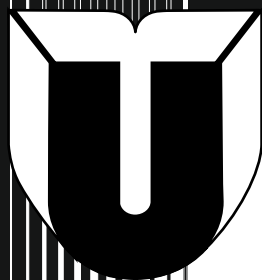
«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Информатика, вычислительная техника и управление
- Энергетика
- Metallургия и материаловедение
- Транспорт

Редколлегия



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Dear Readers!

We would like to bring to your attention the next issue of the scientific journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University". The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published.

The journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University" is included in the international catalog of periodicals "UlrichsPeriodicals Directory", in the EBSCO database, in the scientific electronic library (eLIBRARY.RU). It is sent out to the Russian Book Chamber, All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) Database RAS.

The journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University" is abstracted and reviewed.

**•You are welcome for active and
creative collaboration in the following
fields:**

- Mechanical Engineering and Machine Science
- Information Science, Computer Engineering and Control
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science
- Transport

Editorial Board





Оригинальная статья / Original article

УДК 629.4; 621.534; 62.752

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-10-22>

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЖИМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПОДБРАСЫВАНИЯ ЩЕТКИ В КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ С КОЛЛЕКТОРОМ

© А.В. Елисеев¹, А.И. Орленко²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,

Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

²Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения,

Российская Федерация, 660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Данное исследование связано с разработкой теоретических основ динамики контактной группы элементов коллекторно-щеточного узла. Рассматриваются динамические взаимодействия щетки с коллектором в условиях вибрационного нагружения со стороны корпуса тягового электродвигателя. **МЕТОДЫ.** Особенностью исследования является учет возможности нарушения неустойчивого контакта «щетка – коллектор» в результате вибрационных воздействий внутренних и внешних силовых факторов. Предлагается метод построения математических моделей на основе использования обобщенной функции зазора, представляющий аналитический аппарат учета неустойчивых связей. Построение математической модели предполагает на первичном этапе допустимость сведения расчетной схемы к взаимодействию материальной частицы с вибрирующей поверхностью в гравитационном поле. В рамках рассматриваемой модели учитываются нестандартные силовые факторы путем введения дополнительной квазипостоянной силы, приложенной к щетке. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Показано воздействие силовых факторов на режимы непрерывного подбрасывания щетки. Сформулированы аналитические условия, отражающие особенности взаимодействия щетки на интервале подъема и падения на поверхность коллектора. Представлены результаты численного моделирования силовых факторов для режимов периодического нарушения контакта с непрерывным подбрасыванием щетки. **ВЫВОДЫ.** Разработанная математическая модель взаимодействия элементов коллекторно-щеточного узла с использованием функции зазора позволяет учитывать возможности нарушения контакта в сложных формах взаимодействия щетки с коллектором и может быть использована для создания устройств регулирования режимов контактирования щетки с поверхностью коллектора.

Ключевые слова: коллекторно-щеточный узел, тяговый двигатель, неустойчивые связи, нарушение контакта, функция зазора, непрерывное подбрасывание.

Формат цитирования: Елисеев А.В., Орленко А.И. К вопросу о математическом моделировании режимов непрерывного подбрасывания щетки в контактных взаимодействиях с коллектором // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 10–22. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-10-22

ON MATHEMATICAL MODELING OF BRUSH CONTINUOUS GAP-FORMING MODES IN CONTACT INTERACTIONS WITH COMMUTATOR

A.V. Eliseev, A.I. Orlenko

Irkutsk State Transport University,

15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russian Federation

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch of Irkutsk State Transport University,

89 Lado Ketskhoveli St., Krasnoyarsk 660028, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The study deals with the development of the theoretical bases of the dynamics of commutator contact group elements. The dynamic interaction of the brush and commutator in the conditions of vibration loading of the traction motor body is discussed. **METHODS.** The feature of the study is consideration of a possible loss of the unilateral brush-commutator contact as a result of vibration effects of internal and external forces. The method of mathematical model construction based on the use of the generalized function of the gap and considering unilateral constraints is pro-

¹Елисеев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования, e-mail: eavsh@ya.ru

Andrey V. Eliseev, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Scientific and Education Center of Modern Technologies, System Analysis and Modeling, e-mail: eavsh@ya.ru

²Орленко Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, директор, e-mail: Orlenko_AI@krsk.irkups.ru
Alekssei I. Orlenko, Candidate of technical sciences, Associate Professor, CEO, e-mail: orlenko_ai@krsk.irkups.ru



posed. The first stage of mathematical model construction allows for the possibility of computational scheme reduction to material particle interaction with a vibrating surface in the gravitational field. The model under investigation takes into account non-standard force factors through the introduction of the additional semi-permanent force applied to the brush. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The impact of force factors on continuous gap-forming modes of brushes is shown. The analytical conditions reflecting the interaction features of the brush in the interval of rise and fall on the commutator surface are formulated. The results of numerical simulation of force factors for periodic losses of contact with continuous brush tossing are presented. **CONCLUSIONS.** The developed mathematical model of the commutator element interaction using the function of gap allows to take into account the possibility of contact loss in the complex forms of brush and commutator interactions and can find application in the development of control devices of brush and commutator surface contact modes.

Keywords: commutator, traction motor, unilateral constraints, loss of contact, gap function, continuous tossing

For citation: Eliseev A.V., Orlenko A.I. On mathematical modeling of brush continuous gap-forming modes in contact interactions with commutator. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 10–22. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-10-22

Введение

Вибрационное взаимодействие твердых тел с поверхностями разнообразно по своим формам и широко применяется в динамике технологических машин [1–5]. Теория вибрационных процессов получает свое развитие в частности в процессе моделирования взаимодействия рабочих сред с исполнительными органами транспортных и производственных машинных агрегатов, что отражено в публикациях [6–10].

Все возрастающие сегодня требования к увеличению объемов грузоперевозок и скорости движения электропоездов ставят задачу обеспечения надежности работы элементов тягового электродвигателя электровоза в режимах интенсивного вибрационного нагружения. Решения этой задачи представлены в работах по динамике коллекторно-щеточного узла (КЩУ) и устойчивости процессов токосяема [11–14].

Эффективность работы КЩУ определяется вибрационными режимами внешних силовых воздействий в сочетании с такими внутренними факторами, как условия взаимодействия щеток с поверхностью коллектора [15–21]. Неудерживающий характер динамического взаимодействия элементов КЩУ определяется формой поверхности коллектора и пространственной конфигурацией щеточных контактов, обеспечиваемых прижимными механизмами, что требует детализированного отражения в особенностях построения математической модели взаимодействия элементов

соответствующей механической колебательной системы, допускающей возможность нарушения контактов [22, 23].

Особая роль неударяющих связей, способных формировать периодический отрыв элементов, отмечена в работах [8, 24], где для оценки особенностей динамики механических систем с учетом неударяющих связей разработка математических моделей ведется на основе использования функции зазора. Неударяющие взаимодействия элементов механических колебательных систем на примере модельных задач с реализацией периодических режимов нарушения контакта рассмотрены в публикациях [24–27]. В динамике КЩУ большое значение имеют особенности учета сил трения на динамическое состояние щетки [19].

Вместе с тем методы разработки математических моделей, учитывающих неударяющий характер взаимодействия элементов, недостаточно детально отражают влияние сил трения щетки в ее вертикальном движении о стенки гнезда щеткодержателя на длительность нарушения контакта в режимах непрерывного подбрасывания.

В настоящей статье рассматривается подход к определению динамических характеристик элементов КЩУ в зависимости от нестандартных силовых факторов на основе математической модели с учетом неударяющих связей.



Основные положения. Постановка задачи исследования

Взаимодействие щетки с поверхностью коллектора на предварительном этапе исследования для отражения существенных особенностей динамических характеристик может быть представлено моделью неудерживающего контактирования вертикально движущейся материальной частицы с вибрирующей горизонтальной опорной поверхностью [28]. Неровности поверхности коллектора в процессе взаимодействия со щеткой аппроксимируются гармонической функцией с фиксированной амплитудой A и частотой ω . В точечном контакте поверхность коллектора представляет собой горизонтальную поверхность, совершающую вертикальные гармонические колебания. Характер контактирования щетки с учетом пространственной ориентации прижимного устройства и особенности силового воздействия со стороны корпуса тягового электродвигателя, в рамках модели взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью, представлен двумя силовыми факторами: силой веса и дополнительной силой. Авторами под дополнительной силой понимается сила трения щетки о стенки гнезда щеткодержателя и силовое воздействие со стороны пружины прижимного элемента, представляющие собой постоянные величины, которые, однако, могут быть различными в зависимости от фазового состояния. Так, в интервале времени вертикального подъема щетки в фазе отрыва дополнительная сила может принимать одно значение – значение f_1 , а в фазе опускания щетки на поверхность – другое – значение f_2 .

Рассмотрение различных параметров амплитуды A , частоты ω и силовых факторов с учетом неудерживающего характера связей между щеткой и поверхностью коллектора предполагает возможность нарушения контакта с формированием ряда фазовых состояний. Контакт щетки

с коллектором в предположении, что контактная реакция положительна, задает фазу пролеживания, из которой возможен переход в критическое фазовое состояние, характеризующее нулевой контактной реакцией. В свою очередь из критического фазового состояния возможен переход в отрывную фазу, характеризующуюся положительной величиной зазора – расстоянием между щеткой в свободном движении и поверхностью коллектора.

Наличие гравитационных сил и дополнительных силовых факторов приводит, при выполнении определенных соотношений, к удару щетки о поверхность коллектора в некоторый момент времени, отражающий завершение фазы свободного движения. Полагается, что реализуется абсолютно неупругий удар с тем условием, что в момент касания щетки и коллектора скорость щетки приравнивается к скорости поверхности коллектора.

На рис. 1 представлены принципиальные и расчетные схемы состояния щетки во взаимодействии с коллектором в фазе отрыва и в группе фазовых состояний, объединяющих фазу пролеживания, граничную фазу нулевой реакции в контакте и фазу удара. Чередование представленных фазовых состояний определяет форму движения щетки во взаимодействии с поверхностью коллектора.

Сочетание силовых факторов, действующих на щетку, и учет неудерживающего взаимодействия с поверхностью коллектора, форма движения которого характеризуется амплитудой и частотой, способны приводить к реализации режимов с периодическим отрывом [8].

Задача исследования заключается в разработке метода определения влияния динамических характеристик, отражающих особенности конфигурации дополнительных сил, на характеристики режимов движения щетки во взаимодействии с коллектором с учетом неудерживающих связей.

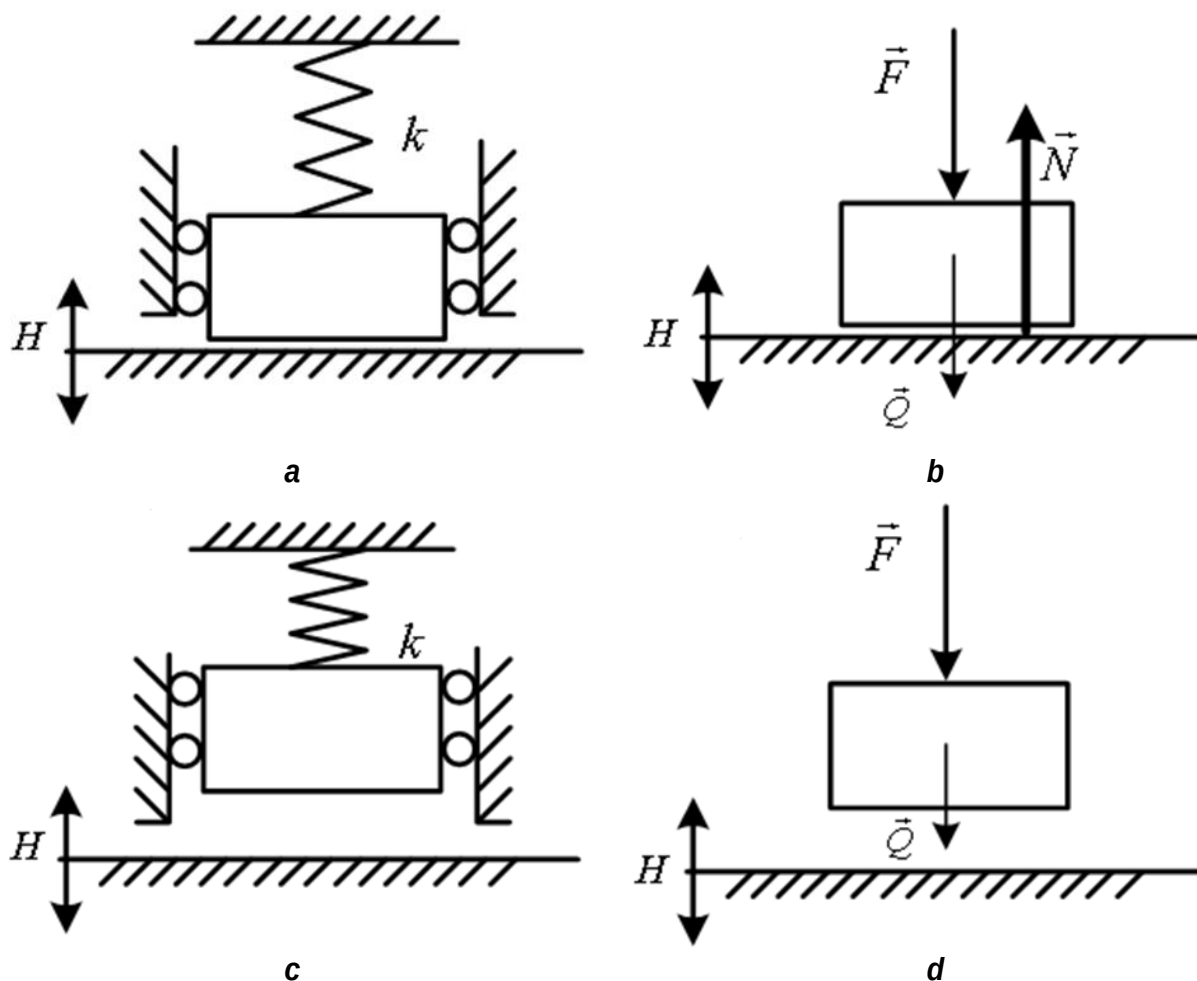


Рис. 1. Фазы взаимодействия щетки с коллектором:
принципиальная (a) и расчетная (b) схемы фазы контакта;
принципиальная (c) и расчетная (d) схемы фазы свободного движения

Fig. 1. Brush and commutator interaction phases: schematic diagram (a), computational scheme (b) of the phase contact; schematic diagram (c), computational scheme (d) of the free motion phase

Математическая модель взаимодействия щетки с коллектором. Введение обобщенной функции зазора

Математическая модель взаимодействия щетки с коллектором в рамках задачи оценки характеристик динамических режимов с отрывом формируется на основе последовательной детализации представлений об особенностях движения щетки с учетом неудерживающих связей. На начальном этапе исследования строится модель свободного движения щетки в отрыве от поверхности коллектора с учетом только сил тяжести при условии, что в начальный момент времени щетка находится в принудительном контакте с поверх-

ностью коллектора. Для учета форм отрывов щетки вводится понятие обобщенной формы свободного движения щетки. Сравнение обобщенной формы свободного движения щетки с формой движения коллектора приводит к аналогичному понятию для учета зазора – обобщенной функции зазора, которая используется для определения критерия отрыва в аналитическом виде. Учет силовых факторов реализуется путем введения коэффициентов, отражающих связь силы веса с дополнительными постоянными силами, действующими на



щетку в процессе чередования фазовых состояний.

Модель свободного движения щетки основана на предположении о возможности построения формы движения щетки из точек ее принудительного контакта с поверхностью коллектора для произвольных моментов времени. Формы свободного движения щетки определяются из множества дифференциальных уравнений с учетом начальных условий, характеризующих принудительный контакт в момент времени t_0 :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 X_H(t, t_0)}{\partial t^2} = -g, \quad t \geq t_0 \\ \left. \frac{\partial X_H(t, t_0)}{\partial t} \right|_{t=t_0} = \left. \frac{\partial H(t)}{\partial t} \right|_{t=t_0} \\ X_H(t, t_0)|_{t=t_0} = H(t)|_{t=t_0} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь обобщенная форма движения щетки X_H представляет собой семейство форм свободных движений с начальными условиями, заданными поверхностью коллектора, вертикальное движение которой аппроксимируется гармонической функцией $H(t) = A \sin \omega t$.

Сравнение полученной на основе решения системы (1) обобщенной формы свободного движения щетки с формой движения поверхности $H(t)$ позволяет локализовать точку отрыва щетки от поверхности коллектора.

Величина превышения формой свободного движения щетки поверхности коллектора представляет собой зазор, формальное рассмотрение которого как разницы между обобщенной формой свободного движения и поверхности коллектора приводит к понятию обобщенной функции зазора:

$$R_H(t, t_0) = X_H(t, t_0) - H(t), \quad (2)$$

где $X_H(t, t_0)$ – семейство форм свободного движения щетки при условии принудительного контакта в момент $t = t_0$; $H(t)$ – фор-

ма вертикального движения поверхности коллектора.

Задача выбора формы отрыва из семейства возможных форм свободного движения щетки может быть сведена к задаче определения формы обобщенного зазора, принимающего положительное значение после отрыва на основе дифференциального критерия, представленного в работе [8]. В частности, использование дифференциального критерия для гармонической формы вертикального движения поверхности коллектора показывает возможность реализации двух различных типов отрыва щетки от коллектора. Отрыв щетки, осуществляющийся в процессе перехода фазы пролеживания в граничную фазу нулевой контактной реакции, может быть определен из условий положительности третьей производной функции зазора [27]:

$$\begin{cases} R_H(t, t_0)|_{t=t_0} = 0, \\ \dot{R}_H(t, t_0)|_{t=t_0} = 0, \\ \ddot{R}_H(t, t_0)|_{t=t_0} = 0, \\ \dddot{R}_H(t, t_0)|_{t=t_0} > 0, \end{cases} \quad (3)$$

где дифференцирование проводится по переменной t .

Наряду с этим в рамках рассматриваемой модели возможен вариант отрыва щетки от поверхности коллектора только на основе характеристик принудительного контакта, если выполнены условия:

$$\begin{cases} R_H(t, t_0)|_{t=t_0} = 0, \\ \dot{R}_H(t, t_0)|_{t=t_0} = 0, \\ \ddot{R}_H(t, t_0)|_{t=t_0} > 0. \end{cases} \quad (4)$$

Дифференциальный критерий для определения точек отрыва может быть использован в качестве классификационного признака точек отрыва на основе порядка производной, принимающей положительные значения после предыдущих нулевых



производных. Так, условие (4) определяет точки отрыва второго порядка, а условие (3) – точки отрыва третьего порядка.

В работе [8] показано, что учет порядка точки отрыва создает предпосылки к разработке теории траекторных режимов периодического нарушения контакта.

Существенным фактором в формировании локальных особенностей нарушения контакта щетки с поверхностью, распространяющимся на характеристики ре-

жимов с периодическим отрывом, являются силовые воздействия на щетку, проявляющие себя в ряде случаев как дополнительные постоянные силы. В рамках оценки эффективности работы КЩУ интерес представляет влияние дополнительных сил на длительность нарушения контакта между щеткой и поверхностью коллектора. Детали исследования представлены в работах [8, 27].

Длительность нарушения контакта в зависимости от конфигурации дополнительных сил. Прямая задача

Рассмотрим длительность нарушения контакта в режиме непрерывного подбрасывания щетки в предположении, что сила после переключения изменяется в α раз. Полагается, что конфигурация сил f_1 и f_2 определяется выражением $f_2 = \alpha f_1$ для некоторого конфигурационного параметра α , принимающего значение, отражающее особенность взаимодействия щетки со средой, в общем случае произвольное вещественное число.

Вариант $\alpha > 1$ означает, что при опускании щетки в гнезде коллектора дополнительная сила, сонаправленная с силой веса, увеличивается. При фиксированном конфигурационном параметре α длительность нарушения контакта в зависимости от дополнительной силы f_1 имеет аналитическое выражение:

$$\Delta T = \left(1 + \sqrt{\frac{1 + \frac{f_1}{mg}}{1 + \frac{\alpha f_1}{mg}}} \right) \left(\frac{A\omega}{g(1 + \frac{f_1}{mg})} - \frac{1}{\omega} \right). \quad (5)$$

Так как $\alpha > 1$, то при условии конечного времени нарушения контакта и реализации отрыва имеется диапазон сил, формирующих фазу нарушения контакта конечной длительности:

$$-\frac{mg}{\alpha} < f_1 < -mg + mA\omega^2. \quad (6)$$

Если $A\omega^2 - g > 0$, то для конфигурационного параметра $\alpha > 1$ рассматриваемый диапазон сил не пуст. Если же $A\omega^2 - g < 0$, то необходимо рассматривать α в диапазоне

$$1 < \alpha < \frac{g}{g - A\omega^2}. \quad (7)$$

Вариант $0 < \alpha < 1$ означает, что в процессе опускания щетки дополнительная сила ослабевает по сравнению с силой, возникающей в процессе подъема после отрыва. Одновременный учет условия конечности длительности нарушения контакта и условия нарушения контакта приводит к выражению

$$-mg < f_1 < -mg + mA\omega^2. \quad (8)$$

Вариант $\alpha < 0$ отражает эффект смены направления действия дополнительной силы в момент достижения щеткой максимальной высоты полета. Совместное выполнение условия конечности длительности нарушения контакта и условия нарушения контакта можно представить в виде интервала для дополнительной силы:



$$-mg < f_1 < -\frac{mg}{\alpha}. \quad (9)$$

Для рассматриваемого варианта конфигурационного параметра условие (9) задает непустое множество дополнительных сил, действующих на щетку в процессе отрыва на стадии подъема. Следует отметить, что по мере приближения дополнительной силы к граничным точкам интервал (9) – время нарушения контакта щетки с поверхностью коллектора, может достигать неограниченно больших значений.

Когда величина дополнительной силы принимает критическое значение $f_0 = m(A\omega^2 - g)$, то длительность наруше-

ния контакта сокращается до нуля. Если для некоторого конфигурационного параметра значение критической силы f_0 превышает максимальное значение диапазона конечной длительности нарушения контакта

$$-\frac{mg}{\alpha} < m(A\omega^2 - g), \quad (10)$$

то соответствующие графики длительностей нарушения контакта принимают вид кривых, приведенных на рис. 2 (кривые представлены для различных параметров α).

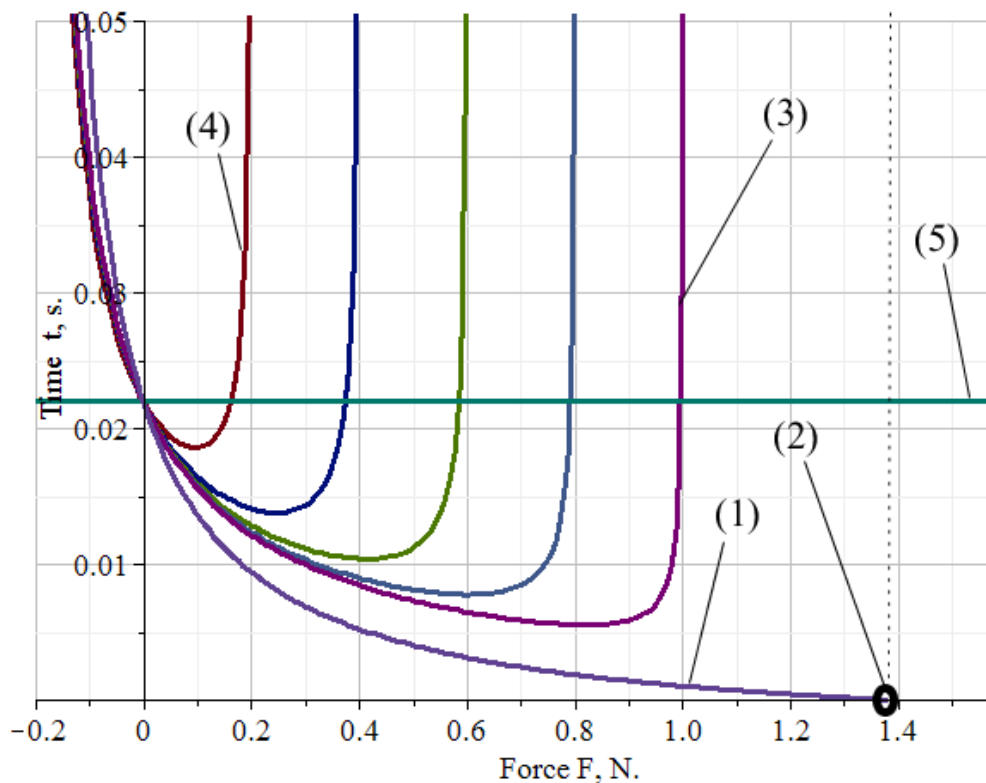


Рис. 2. Длительность нарушения контакта для конфигурационного параметра $\alpha < 0$:
 $A = 0,0002$ м; $\omega = 100$ Гц; $m = 0,02$ кг;

1 – график подлета для варианта, когда переключения не происходит и сила сохраняет интенсивность в течение всего периода движения щетки; 2 – величина силы подавления подбрасывания; 3 – график для параметра $\alpha = -0,2$; 4 – график для параметра $\alpha = -1$;

5 – график времени подлета при отсутствии дополнительных сил

Fig. 2. Contact loss duration for the configuration parameter $\alpha < 0$: $A = 0.0002$ m; $\omega = 100$ Hz; $m = 0.02$ kg;

1 – curve of gap duration for the variant when switching does not occur and the intensity of force remains unchanged throughout the whole period of brush motion; 2 – gap suppression force magnitude;

3 – curve for the parameter $\alpha = -0.2$; 4 – curve for the parameter $\alpha = -1$;

5 – curve of gap duration in the absence of additional forces



Конфигурация сил, обеспечивающая фиксированное время нарушения контакта. Обратная задача

Рассмотрим сочетание дополнительных сил, обеспечивающих фиксированную длительность нарушения контакта щетки с поверхностью коллектора.

Для определения конфигурации сил, при которых длительность нарушения контакта составляет величину T_0 , рассматривается уравнение относительно f_1, f_2 , выступающих в роли искоемых неизвестных:

$$\left(1 + \sqrt{\frac{1 + \frac{f_1}{mg}}{1 + \frac{f_2}{mg}}}\right) \left(\frac{A\omega}{g(1 + \frac{f_1}{mg})} - \frac{1}{\omega}\right) = T_0. \quad (11)$$

Для разрешимости уравнения (11) необходимо выполнение условия

$$\sqrt{\frac{1 + \frac{f_1}{mg}}{1 + \frac{f_2}{mg}}} = \left(\frac{T_0}{\frac{A\omega}{g(1 + \frac{f_1}{mg})} - \frac{1}{\omega}}\right) - 1 > 0. \quad (12)$$

Можно показать, что дополнительная сила f_1 должна лежать в интервале

$$-mg + \frac{1}{T_0\omega + 1} m A \omega^2 < f_1 < -mg + m A \omega^2. \quad (13)$$

При выполнении для силы f_1 условий (13) искомая дополнительная сила однозначно представляется в виде дробно-рациональной функции.

Рассмотрим вариант независимых значений f_1 и f_2 . Полагается, что на щетку, взаимодействующую с поверхностью коллектора, действуют дополнительные силы f_1 и f_2 на интервале движения щетки вверх после отрыва и на интервале движения щетки вниз после отрыва соответственно, и эти силы независимы.

Рассмотрим плоскость YOX с декартовой системой координат (рис. 3). Каждой точке $F = (f_1, f_2)$ плоскости YOX ставится в соответствие режим непрерывного подбрасывания щетки с учетом дополнительных сил f_1, f_2 . Положительному значению соответствует дополнительная сила, направленная в сторону силы тяжести. Аналогично, отрицательному значению соответствует сила, направленная в противоположную сторону к силе тяжести. На плоскости рассматривается область, ограниченная двумя отрезками – CE и FD , параллельными оси ординат. Внутри обозначенной области, определяющей множество конфигураций дополнительных сил, реализуется периодическое нарушение контакта щетки с поверхностью коллектора.

На рис. 3 данное конфигурационное множество обозначено $ECFD$. По мере приближения к границе области CE и CF длительность нарушения контакта щетки с коллектором неограниченно возрастает. По мере приближения к границе FD длительность нарушения контакта убывает до нуля. Если точка силовой конфигурации F лежит вне данной области, то щетка находится либо в зоне невозможности нарушения контакта с поверхностью коллектора, то есть правее прямой FD , либо в области бесконечной длительности нарушения контакта, то есть или левее прямой EC , или ниже прямой CF и одновременно левее прямой FD . Область периодического нарушения контакта условно можно разделить на подобласти в зависимости от рассматриваемых режимов.

Области внутри треугольников DYO и OBC определяют конфигурацию дополнительных сил, обладающих тем свойством, что на интервале опускания щетки в режиме с непрерывным подбрасыванием интенсивность силы, сохраняя свое направление, возрастает по сравнению с силой, действующей на интервале подъема щетки (на рис. 3 данная область обозначена цифрой II).

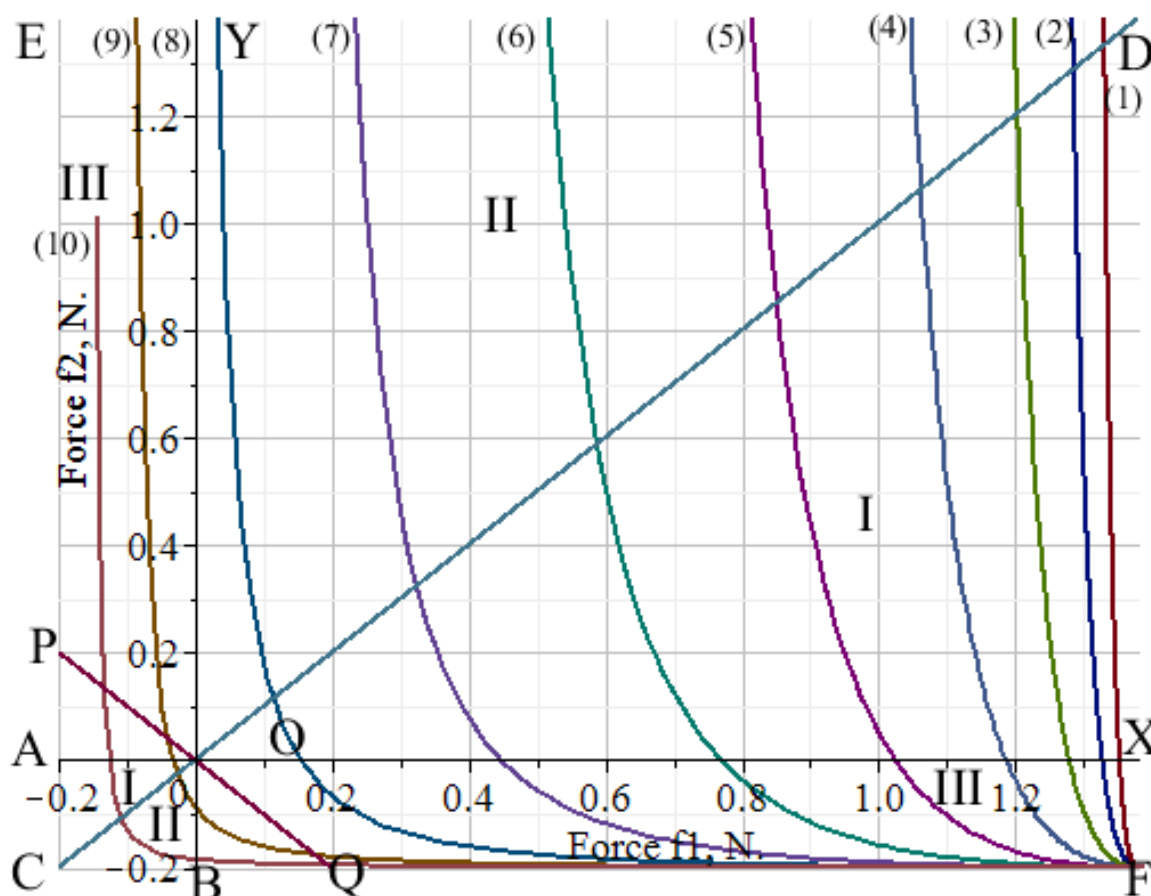


Рис. 3. Множество режимов отрыва с фиксированной длительностью подлета:

C – точка с координатами $(-mg, -mg)$; F – точка с координатами $(-mg + mA\omega^2, -mg)$.

Линии (1)–(10) – линии уровня для длительности подлета (c) щетки соответственно равного значениям: 0,0001; 0,0002; 0,0004; 0,0008; 0,0016; ...; 0,0512

Fig. 3. Set of loss contact modes with the fixed gap duration: C – point with coordinates $(-mg, -mg)$, F – point with coordinates $(-mg + mA\omega^2, -mg)$. Curves (1)–(10) are the lines of the level for brush gap duration (c) equal to the values 0.0001, 0.0002, 0.0004, 0.0008, 0.0016, ...; 0.0512 respectively

Область внутри треугольников CAO и ODX определяет конфигурацию сил, интенсивность которых понижается в результате смены направления щетки в фазе отрыва от поверхности (на рис. 3 данная область обозначена цифрой I).

Область внутри прямоугольников $AOYE$ и $BOXD$, обозначенная на рис. 3 цифрой III, определяет конфигурацию сил, меняющих свое направление в результате смены направления щеткой движения в фазе отрыва. Множество режимов, для которых дополнительная сила при смене направления сохраняет свой модуль, обозначено на рис. 3 отрезком PQ . В концах отрезка, а именно в точках P и Q , создаются условия реализации режима с наруше-

нием контакта «бесконечной» продолжительности. Для такого режима можно найти сочетание сил, которые минимизируют высоту подлета щетки при условии, что точка F лежит правее точки Q . Это условие равносильно неравенству $mg < -mg + mA\omega^2$. При дальнейшем движении вдоль прямой PQ происходит переход взаимодействия в безвозвратный режим отрыва щетки.

При более детализированном рассмотрении коллекторно-щеточного узла можно отметить, что щетка, имея неудерживающие связи, взаимодействует не только с поверхностью коллектора, но и с элементами щеткодержателя, в частности, с пружиной, которая в свою очередь обладает определенными массоинерционными



свойствами. При таком подходе динамика взаимодействия элементов КЩУ усложняется из-за возможностей влияния второй неударживающей связи.

Представленные варианты режимов

позволяют рассматривать дополнительную силу как фактор возможного регулирования динамического состояния контактного взаимодействия щетки с поверхностью коллектора.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать ряд выводов:

1. Авторами разработана новая математическая модель взаимодействия элементов коллекторно-щеточного узла, которая позволяет учитывать возможности нарушения контакта в сложных формах взаимодействия щетки с коллектором.

2. Предложена периодизация контактного взаимодействия, представленная различными фазовыми состояниями: фазой пролеживания, граничным состоянием контакта, фазой отрыва, фазой соударения с поверхностью.

3. Введено новое понятие в виде обобщенной функции зазора, которая предопределяет детализацию представлений о различных формах нарушения контакта и может задавать классификацион-

ный признак на основе дифференциального критерия отрыва.

4. Показано, что дополнительная сила, отражающая особенности сил трения и воздействие со стороны прижимного устройства, представляет собой существенный фактор, определяющий длительность нарушения контакта щетки с поверхностью коллектора, и оказывает воздействие на особенности формирования режимов с непрерывным подбрасыванием.

5. Аналитический результат решения обратной задачи по определению дополнительных сил, обеспечивающих фиксированную длительность нарушения контакта, может быть использован для разработки устройств регулирования режимов контактирования щетки с поверхностью коллектора.

Библиографический список

1. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Springer International Publishing. Switzerland, 2016. 708 p.
2. Rocard Y. General Dynamics of Vibrations. Paris: Masson, 1949. 458 p.
3. Clarence W. de Silva. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
4. Harris C.M. Crede C. E. Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw – Hill Book Co, 2002. 1457 p.
5. Front Matter, In Power Electronics Handbook (Fourth Edition), edited by Muhammad H. Rashid, Butterworth-Heinemann, 2018. 1510 p.
6. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: ИД «Руда и металлы», 2013. 640 с.
7. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов: монография. М.: Изд-во Института компьютерных технологий, 2006. 176 с.
8. Елисеев А.В., Сельвинский В.В., Елисеев С.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неударживающих связей: монография. Новосибирск: Наука, 2015. 332 с.
9. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударно-

- го упрочнения: монография Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. 568 с.
10. Гончаревич И.Ф., Фролов. К.В. Теория вибрационной техники. М.: Наука, 1981. 320 с.
11. Бочаров В.И., Захаров В.И., Коломейцев Л.Ф. и др. Тяговые электродвигатели электровозов; под ред. В.Г. Щербакова. Новочеркасск: Агентство «Наутилус», 1998. 672 с.
12. Орленко А.И., Петров М.Н., Терегулов О.А. Комплексная диагностика тягового электродвигателя электровоза: монография. Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2016. 218 с.
13. Орленко А.И., Петров М.Н., Терегулов О.А. Исследование повреждений подвижного состава железной дороги сибирского региона: монография. Красноярск: Изд-во КРИЖТ ИрГУПС, 2016. 198 с.
14. Шантаренко С.Г., Кузнецов В.Ф., Пономарев Е.В., Тараненко В.А. Повышение качества токо-съемы в контакте «щетка–коллектор» тягового электродвигателя электровоза 2ЭС6 // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 77–80.
15. Авилов В.Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2013. 356 с.



16. Авилов В.Д. Влияние соотношения воздушных зазоров в магнитной цепи дополнительных полюсов тяговых и других электрических машин на условия коммутации // Пути повышения энергетической эффективности магистральных электропоездов: межвуз. сб. науч. тр. Омск: Изд-во ОмИИТ, 1984. С. 55–61.
17. Авилов В.Д., Харламов В.В., Нехаев В.А., Шко-дун П.К. Влияние динамического взаимодействия железнодорожного пути и локомотива на качество функционирования тягового электродвигателя // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Красноярск, 19–21 мая 2005 г.). Красноярск: Гротеск, 2005. С. 433–438.
18. Авилов В.Д., Харламов В.В., Грязнов П.А., Сер-геев Р.В. Перспектива повышения качества работы коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока // Исследование процессов взаимодействия объектов железнодорожного транспорта с окружа-ющей средой: сб. ст. по результатам выполнения программы фундаментальных и поисковых научно-исследовательских работ за 1997 год. Омск: Изд-во ОмГУПС, 1997. С. 55–61.
19. Харламов В.В. Методы и средства диагностиро-вания технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография Омск: Изд-во ОмГУПС, 2002. 233 с.
20. Харламов В.В., Безбородов Ю.Я., Козлов В.Н. Диагностика состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока Коммутация в тяговых электродвигателях // Коммутация в тяговых элек-тродвигателях и других коллекторных машинах: межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск: Изд-во ОмИИТ, 1985. С. 44–47.
21. Карасев М.Ф., Беляев В.П., Козлов В.Н., Трушков А.М., Авилов В.Д., Елисеев С.В. Оптимальная ком-мутация машин переменного тока: монография. М.: Транспорт, 1967. 180 с.

22. Елисеев С.В., Лоткин О.И. Условия существова-ния и нарушения контакта для систем с не удержи-вающими связями // Труды ОМИИТа. 1966. Вып. 69. С. 93–99.
23. Елисеев С.В., Марков К.К. Некоторые вопросы динамики колебательного процесса при не удержи-вающих связях // Механика и процессы управления: сб. ст. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1971. С. 71–83.
24. Eliseev A.V., Artyunin A.I., Eliseev S.V. Generalized gap function in the dynamic interaction problems of elements of vibrational technological machines with “not holding” ties // Vibroengineering Procedia. Kaunas, Lithuania. October 2016. Vol. 8. P. 495–500.
25. Eliseev A.V., Artyunin A.I., Sigachev N.P., Sitov I.S. Unilateral constraints in vibrating technological pro-cesses: mathematical models, features of interaction of elements // The fifth International Symposium on Inno-vation and Sustainability of Modern Railway (ISMR'2016). Nanchang, China, October 20–21, 2016. P. 261–269.
26. Eliseev A.V., Sitov I.S. Model problems of dynamics of mechanical vibration systems with unilateral con-straints // Proceedings of the fourth international sym-posium on innovation & Sustainability of modern railway (ISMR'2014). Irkutsk: Publishing by Irkutsk State Transport University, 2014. P. 181–185.
27. Ситов И.С., Елисеев А.В. Теоретические основы процессов взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью с не удерживающими связями // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4 (16). С. 19–29.
28. Елисеев А.В. Особенности взаимодействия ма-териальной частицы с вибрирующей поверхностью в зависимости от дополнительной силы с не удержи-вающей связью // Международный журнал приклад-ных и фундаментальных исследований. 2013. № 3. С. 9–15.

References

1. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protec- tion. Springer International Publishing. Switzerland, 2016, 708 p.
2. Rocard Y. General Dynamics of Vibrations. Paris: Masson, 1949, 458 p.
3. Clarence W. de Silva. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000, 957 p.
4. Harris C.M. Crede C. E. Shock and Vibration Hand- book. New York: McGraw – Hill Book Co, 2002, 1457 p.
5. Front Matter, In Power Electronics Handbook (Fourth Edition), edited by Muhammad H. Rashid, Butterworth-Heinemann, 2018, 1510 p.
6. Blekhnman I.I. *Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika* [Theory of vibrational processes and devices. Vibrational mechanics and vibration equipment]. Sankt- Peterburg: Ruda i metally Publ., 2013, 640 p. (In Rus- sian)
7. Panovko G.Ya. *Dinamika vibratsionnykh tekhnolog- icheskiy protsessov* [Dynamics of vibrational techno- logical processes]. Moscow: Institut komp'yuternykh tekhnologii Publ., 2006, 176 p. (In Russian)
8. Eliseev A.V., Sel'vinskii V.V., Eliseev S.V. *Dinamika vibratsionnykh vzaimodeistviy elementov tekhnolog- icheskiy sistem s uchetom neuderzhivayushchikh svyazei* [Dynamics of vibratory interactions of techno- logical system elements with account of unilateral con- straints]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2015, 332 p. (In Russian)
9. Kopylov Yu.R. *Dinamika protsessov vibroudarnogo uprochneniya* [Dynamics of shock vibrating strengthen- ing] Voronezh: Nauchnaya kniga Publ., 2011, 568 p. (In Russian)
10. Goncharevich I.F., Frolov. K.V. *Teoriya vibratsion- noi tekhniki* [Theory of vibratory technology] Moscow: Nauka Publ., 1981, 320 p. (In Russian)
11. Bocharov V.I., Zakharov V.I., Kolomeitsev L.F. i dr.



Tyagovye elektrodvigateli elektrovozov [Traction motors of electric locomotives]. Pod red. V.G. Shcherbakova. Novocherkassk: Agentstvo "Nautilus" Publ., 1998, 672 p. (In Russian)

12. Orlenko A.I., Petrov M.N., Teregulov O.A. *Kompleksnaya diagnostika tyagovogo elektrodvigatelya elektrovoza* [Integrated diagnostics of electric locomotive traction motor]. Krasnoyarsk: OOO "Polikom" Publ., 2016, 218 p. (In Russian)

13. Orlenko A.I., Petrov M.N., Teregulov O.A. *Issledovanie povrezhdenii podvizhnogo sostava zheleznoi dorogi sibirskogo regiona* [Damage investigation of Siberian railway rolling stock]. Krasnoyarsk: KriZhT IrGUPS Publ., 2016, 198 p. (In Russian)

14. Shantarenko S.G., Kuznetsov V.F., Ponomarev E.V., Taranenko V.A. Improving quality of current collection in touch "brush-collector" 2ES6 electric traction motor. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2016, no. 5 (149), pp. 77–80. (In Russian)

15. Avilov V.D. *Optimizatsiya kommutatsionnogo protsesssa v kollektornykh elektricheskikh mashinakh postoyannogo toka* [Optimization of switching in DC electrocommutators]. Omsk: OmGUPS Publ., 2013, 356 p. (In Russian)

16. Avilov V.D. *Vliyaniye sootnosheniya vozduzhnykh zazorov v magnitnoi tsepi dopolnitel'nykh polyusov tyagovykh i drugikh elektricheskikh mashin na usloviya kommutatsii* [Influence of air gap ratio in the magnetic circuit of additional poles of traction and other electric machines on commutation conditions]. *Puti povysheniya energeticheskoi effektivnosti magistral'nykh elektrovozov: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Ways to improve the energy efficiency of mainline electric locomotives: interuniversity collection of scientific papers]. Omsk: OmlIT Publ., 1984, pp. 55–61. (In Russian)

17. Avilov V.D., Kharlamov V.V., Nekhaev V.A., Shkodun P.K. *Vliyaniye dinamicheskogo vzaimodeistviya zheleznodorozhnogo puti i lokomotiva na kachestvo funktsionirovaniya tyagovogo elektrodvigatelya* [Effect of railway track and locomotive dynamic interaction on traction motor operation quality]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Resursosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte"* [Materials of all-Russian scientific and technical conference with international participation "Resource-saving technologies on railway transport"]. Krasnoyarsk: Grotesk Publ., 2005, pp. 433–438. (In Russian)

18. Avilov V.D., Kharlamov V.V., Gryaznov P.A., Sergeev R.V. *Perspektiva povysheniya kachestva raboty kollektorno-shchetchnogo uzla mashin postoyannogo toka* [The prospects of improving operation efficiency of DC brush-commutator unit]. *Issledovanie protsessov vzaimodeistviya ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta s okruzhayushchei sredoi: sbornik statei po rezul'tatam vypolneniya programmy fundamental'nykh i poiskovykh nauchno-issledovatel'skikh rabot za 1997 god* [Study of railway transport interaction with the environment: collection of articles on the outcomes of the

program of fundamental and exploratory researches for 1997]. Omsk: OmGUPS Publ., 1997, pp. 55–61. (In Russian)

19. Kharlamov V.V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigatelykh i drugikh kollektornykh mashin postoyannogo toka* [Methods and tools for diagnosing the technical condition of the brush-commutator unit of traction electric motors and other DC commutator machines]. Omsk: OmGUPS Publ., 2002, 233 p. (In Russian)

20. Kharlamov V.V., Bezborodov Yu.Ya., Kozlov V.N. *Diagnostika sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla mashin postoyannogo toka. Kommutatsiya v tyagovykh elektrodvigatelyakh* [Diagnostics of the brush-commutator unit of DC machines. Commutation in traction motors]. *Kommutatsiya v tyagovykh elektrodvigatelyakh i drugikh kollektornykh mashinakh: mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov* [Switching in traction motors and other commutators: interuniversity thematic collection of scientific works]. Omsk: OmlIT Publ., 1985, pp. 44–47. (In Russian)

21. Karasev M.F., Belyaev V.P., Kozlov V.N., Trushkov A.M., Avilov V.D., Eliseev S.V. *Optimal'naya kommutatsiya mashin peremennogo toka* [Optimal commutation of AC machines]. Moscow: Transport Publ., 1967, 180 p. (In Russian)

22. Eliseev S.V., Lotkin O.I. Conditions for the existence and loss of contact for the systems with unilateral constraints. *Trudy OMIITa* [Proceedings of Omsk Institute of Railway Engineers]. 1966, issue 69, pp. 93–99. (In Russian)

23. Eliseev S.V., Markov K.K. *Nekotorye voprosy dinamiki kolebatel'nogo protsesssa pri neuderzhivayushchikh svyazyakh* [Some problems of oscillatory process dynamics at unilateral constraints]. *Mekhanika i protsessy upravleniya: sbornik statei* [Mechanics and Control Processes: Collection of articles]. Irkutsk: IPI Publ., 1971, pp. 71–83. (In Russian)

24. Eliseev A.V., Artyunin A.I., Eliseev S.V. Generalized gap function in the dynamic interaction problems of elements of vibrational technological machines with "not holding" ties. *Vibroengineering Procedia*. Kaunas, Lithuania. October 2016. Vol. 8, pp. 495–500.

25. Eliseev A.V., Artyunin A.I., Sigachev N.P., Sitov I.S. Unilateral constraints in vibrating technological processes: mathematical models, features of interaction of elements. The fifth International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR'2016). Nanchang, China, October 20–21, 2016, pp. 261–269.

26. Eliseev A.V., Sitov I.S. Model problems of dynamics of mechanical vibration systems with unilateral constraints. Proceedings of the fourth international symposium on innovation & Sustainability of modern railway (ISMR'2014). Irkutsk: Publishing by Irkutsk State Transport University, 2014, pp. 181–185.

27. Sitov I.S., Eliseev A.V. Theoretical bases of processes of interaction of a material particle with a vibrating surface with "not-holding" ties. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2012,



no. 4 (16), pp. 19–29. (In Russian)

28. Eliseev A.V. Features of the interaction of material particles with a vibrating surface depending on the additional force with “not-holding” ties. *Mezhdunarodnyi*

zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy [International journal of applied and fundamental research]. 2013, no. 3, pp. 9–15. (In Russian)

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 20.11.2017 г.

The article was received 20 November 2017



Оригинальная статья / Original article
УДК 622.24+621.694.2
<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-23-29>

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СТРУЙНОГО НАСОСА НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

© А.П. Мельников¹, Н.А. Буглов²

¹Геологоразведочный техникум Иркутского национального исследовательского технического университета, Российская Федерация, 640074, Иркутск, ул. Лермонтова, 104.

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Несмотря на значительное количество разработанных конструкций и широкий спектр применения скважинных струйных насосов, эффективность их использования не всегда соответствует необходимым требованиям. Поэтому выполнение комплекса работ по исследованию условий эффективной эксплуатации эжекторных систем в процессе сооружения нефтегазовых скважин, а также нормирование требований их изготовления, эксплуатации и ремонта в условиях нефтегазовых предприятий является актуальной задачей. **ЦЕЛЬ.** Повышение эффективности использования скважинных струйных насосов в процессе бурения нефтяных и газовых скважин. **МЕТОДЫ.** При исследовании использовалось математическое моделирование процесса с применением законов сохранения, непрерывности массы и количества движения жидкости потоков. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Установлена зависимость характеристик струйного насоса от шероховатости его проточной части.

Ключевые слова: бурение, струйный насос, эжектор, относительный напор, коэффициент эжекции, первичное вскрытие.

Формат цитирования: Мельников А.П., Буглов Н.А. Влияние шероховатости проточной части струйного насоса на его характеристики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 23–29. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-23-29

EFFECT OF WET END ROUGHNESS ON JET PUMP CHARACTERISTICS

A.P. Melnikov, N.A. Buglov

Geological Prospecting College of Irkutsk National Research Technical University,
104 Lermontov St., Irkutsk, 640074, Russian Federation
National Research Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The relevance of the work is determined by the fact that the significant number of developed designs and wide application range of downhole jet pumps does not always provide the operation efficiency that meets necessary requirements. Therefore, the execution of works on the study of effective operation conditions of jet systems at the construction stage of oil and gas wells, as well as the valuation of their manufacturing requirements, maintenance and repair at oil and gas enterprises is an immediate problem. The **PURPOSE** of the work is to improve the application efficiency of downhole jet pumps in oil and gas well drilling. **METHODS.** The study involves mathematical modeling of the process with the use of the laws of mass conservation and continuity and the amount of fluid flows. **RESULTS.** The dependence of jet pump characteristics on its wet end roughness has been determined.

Keywords: drilling, jet pump, ejector, relative pressure, ejection ratio, primary opening

For citation: Melnikov A.P., Buglov N.A. Effect of wet end roughness on jet pump characteristics. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 23–29. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-23-29

¹Мельников Александр Павлович, преподаватель, e-mail: melnikov200910@yandex.ru
Aleksandr P. Melnikov, Lecturer, e-mail: melnikov200910@yandex.ru

²Буглов Николай Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой нефтегазового дела, e-mail: bna@istu.edu
Nikolai A. Buglov, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Oil and Gas Business, e-mail: bna@istu.edu



Введение

Большинство технико-экономических показателей бурения нефтяных и газовых скважин в той или иной мере связано с качеством их промывки, которая обеспечивает: транспортирование шлама на поверхность; смазку и охлаждение породоразрушающего инструмента; создание гидростатического давления на забой выработки и укрепление стенок ее ствола. Для достижения названных целей может быть использована интенсивная промывка скважины за счет максимальной подачи буровых насосов. Однако при этом необходимо учитывать, что у насосов объемного типа происходит увеличение потребляемой мощности в кубической зависимости. Повышение расхода очистного агента усиливает скорость восходящего потока и может привести к поглощениям и кавернообразованию. В силу этого возникает необходимость балансирования между максимальной и минимальной подачей буровых насосов, а также в реализации мероприятий по предупреждению возможных осложнений от изменения скорости рабочего потока промывочной жидкости, а именно: уменьшать риск прихвата бурильной колонны, образование сальников, гидроразрыв пласта и т.п.

Для нейтрализации этих негативных явлений можно использовать струйные насосы, которые способны создавать дополнительный контур интенсивной циркуляции в призабойной зоне за счет инъекции

очистного агента из затрубного пространства бурильной колонны и инициировать перепад давления на забое скважины, то есть обеспечивать местную депрессию пласта (давление пласта превышает гидростатическое давление) [1]. Они также способны повышать расход бурового раствора на гидромониторных насадках долота и увеличить механическую скорость бурения [2, 3]. Поэтому применение струйных насосов в процессе строительства скважин достаточно актуально, особенно в зонах поглощения бурового раствора.

В реальных призабойных условиях (высокие значения температуры и давления, коррозионно-агрессивная внешняя среда) струйный насос работает в экстремальном режиме, при этом характеристики рабочих поверхностей оборудования меняются в широких пределах, что негативно сказывается на эффективности использования эжектора. В связи с этим возникает необходимость исследовать влияние шероховатости проточной части струйного насоса на результативность его эксплуатации.

В настоящее время наиболее полно опыт применения в промышленности данных устройств и методики расчета их конструктивных параметров приведены в трудах Р.С. Яремийчука [4], Ю.А. Сазонова³, П.Н. Каменева [5], Ю.Л. Кирилловского [6], Е.Я. Соколова [7].

Анализ влияния шероховатости рабочих поверхностей на рабочие характеристики струйного насоса

На рис. 1 представлена схема струйного насоса с учетом шероховатости R_z его проточной части. На основании экспериментальных исследований и теорети-

ческих предположений Кармана, Прандтля, Никурадзе и других специалистов считается, что в потоках, которые находятся в условиях турбулентного режима на поверх-

³Сазонов Ю.А. Разработка устройства, снижающего дифференциальное давление на забое скважины и повышающего скорость бурения: дис. ... канд. техн. наук: 130602. М., 1989. 176 с. / Sazonov Yu.A. Development of a device reducing differential pressure in the bottom hole and increasing drilling speed: Candidate's Dissertation in technical sciences: 130602. Moscow, 1989. 176 p.



ностях труб, стен и каналов, существует довольно тонкий слой жидкости с режимом движения, близким ламинарному. Этот слой жидкости называется *ламинарным подслоем*. При этом толщина его очень мала и измеряется долями миллиметра. Другая же часть потока создает так называемое *турбулентное ядро*. Между ламинарным подслоем и турбулентным ядром существует переходный слой со смешанным режимом движения (временами ламинарным, временами турбулентным с хорошо видимыми срывами вихрей).

Для решения поставленной задачи

предположим, что поток, который находится в турбулентном режиме, состоит из ламинарного подслоя, переходного слоя и турбулентного ядра (рис. 2, а) и движется по трубе, у которой выступления шероховатости имеют размер R_z . Если ламинарный подслой толщиной δ , обволакивающий высоту неровностей, полностью перекрывает их (рис. 2, б), то потери напора не будут зависеть от степени шершавости стенок трубы. В этом случае жидкость скользит по ламинарному подслою, и имеет место трение жидкости о жидкость [8].

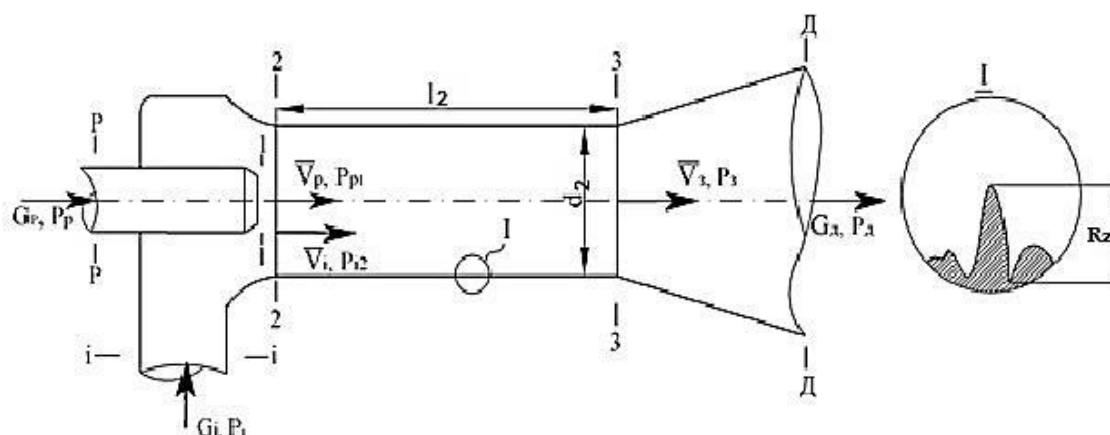


Рис. 1. Схема для расчета струйного насоса с учетом шероховатости его проточной части

Fig. 1. Calculation scheme of the jet pump considering its wet end roughness

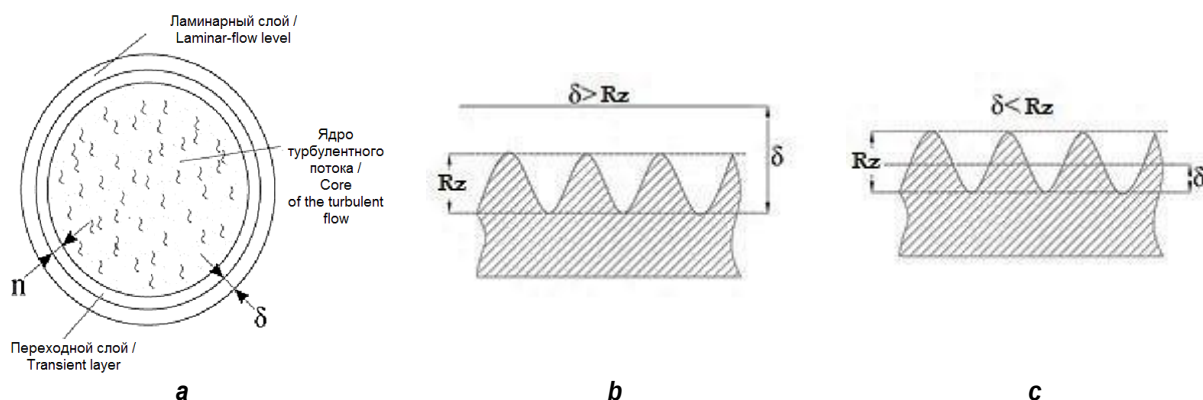


Рис. 2. Физические явления в турбулентном потоке жидкости:

- а – схема размещения слоев турбулентного потока;
- б – размещение ламинарного подслоя в случае гладкого трения турбулентного потока;
- с – размещения ламинарного подслоя в случае квадратичного трения турбулентного потока

Fig. 2. Physical effects in a turbulent liquid flow:

- а – arrangement diagram of turbulent flow layers;
- б – arrangement of the laminar sublayer in the case of smooth friction of the turbulent flow;
- с – arrangement of the laminar sublayer in the case of a quadratic friction of the turbulent flow



Если же выступления шероховатости превышают толщину ламинарного подслоя (рис. 2, с), то потери напора будут в значительной степени зависеть от шершавости стенок, так как в этом случае трение жидкости проходит о частые неровности внутренней поверхности забойного устройства, не сглаженные ламинарным подслоем. В соответствии с этим различают две категории стенок труб – гладкие ($\delta > Rz$) и шероховатые ($Rz > \delta$). В то же время необходимо отметить, что понятие *гладкая стенка* является относительным, так как толщина ламинарного подслоя зависит от числа Рейнольдса и уменьшается с его увеличением.

Уравнение характеристики струйного насоса для однородного рабочего и инжектируемого потока приведено в работе [7]:

$$\bar{h} = \frac{\varphi_1^2}{K} \left[2\varphi_2^2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{i^2}{K-1} - \right. \\ \left. - (2 - \varphi_3^2) \frac{(1+i)^2}{K} \right], \quad (1)$$

где $\bar{h}$ – относительный напор струйного насоса, безразмерная величина; i – коэффициент инжекции струйного насоса; K – основное геометрическое соотношение струйного насоса; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – коэффициенты скоростей рабочей насадки, камеры смешивания, диффузора, входного участка камеры смешивания соответственно.

Согласно экспериментальным данным, авторы работы [7] рекомендуют принимать следующие величины коэффициентов скоростей:

$$\varphi_1 = 0,950; \varphi_2 = 0,975; \\ \varphi_3 = 0,900; \varphi_4 = 0,925.$$

Определение коэффициентов скорости проточной части струйного насоса

Коэффициент скорости рабочей насадки $\varphi_1 = 0,950$ соответствует значению, описанному в теории истечения через конфузорную насадку, и поэтому ставить его под сомнение не будем. В силу этого считаем, что величина коэффициента скорости рабочей насадки струйного насоса не зависит от шероховатости его проточной части.

Так как геометрическая конфигурация входного участка в камеру смешивания струйного насоса не predetermined из-за его незначительной длины, то можно предположить, что на коэффициент φ_4 слабо влияет шероховатость проточной части данного забойного устройства. Согласно рекомендациям авторов работы [7], значение φ_4 принимаем равным 0,925.

Одновременно с этим определим величины коэффициентов скоростей камеры смешивания и диффузора с учетом шероховатости его проточной части. Для этого будем рассматривать элементы струйного насоса как местные гидравлические сопротивления. Согласно [8] коэффициент скорости местного сопротивления определяется из зависимости

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}}, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления.

В случае камеры смешивания (см. рис. 1) эквивалентный коэффициент местного сопротивления можно вычислить по следующей формуле [8]:

$$\xi_2 = \frac{\lambda l_2}{d_2}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, который находится по формуле Альтшуля (зона смешанного гидравлического трения); d_2 – диаметр камеры смешивания, м.

Коэффициент скорости камеры смешения можно рассчитать из выражения

$$\varphi_2 = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{\lambda l_2}{d_2}}}. \quad (4)$$

Для диффузора коэффициент местного сопротивления определяется из зависимости [8]



$$\xi_3 = \frac{\lambda}{8 \sin \alpha_3} \left(1 + \frac{1}{n_3^2} \right) + 3,2 \tan \alpha_3 \sqrt{\tan \alpha_3} \left(1 + \frac{1}{n_3^2} \right)^2, \quad (5)$$

где α_3 – угол расширения в диффузоре, рад; $n_3 = \frac{d_3}{d_2}$ – расширение диффузора (безразмерная величина); d_3 – диаметр на выходе из диффузора, м.

Коэффициент скорости диффузора устанавливается по формуле

$$\varphi_3 = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\lambda}{8 \sin \alpha_3} \left(1 + \frac{1}{n_3^2} \right) + 3,2 \tan \alpha_3 \sqrt{\tan \alpha_3} \left(1 + \frac{1}{n_3^2} \right)^2}}, \quad (6)$$

Коэффициент гидравлического трения λ в выражении (6) вычисляется так же, как и для камеры смешивания, то есть они равны.

В таблице приведены коэффициенты скоростей струйного насоса для разных значений шероховатости его проточной части.

На рис. 3 отображены характеристика струйного насоса ($K = 6,25$) с учетом шероховатости $Rz = 0$ мкм и теоретическая характеристика по рекомендации Е.Я. Соколова [7].

Коэффициенты скорости струйного насоса в зависимости от шероховатости его проточной части
Coefficients of jet pump velocity depending on its wet end roughness

Абсолютная шероховатость, мкм / Absolute roughness, μm	φ_2	φ_3
0	0,967	0,957
20	0,924	0,946
60	0,904	0,940
100	0,894	0,938
150	0,884	0,935

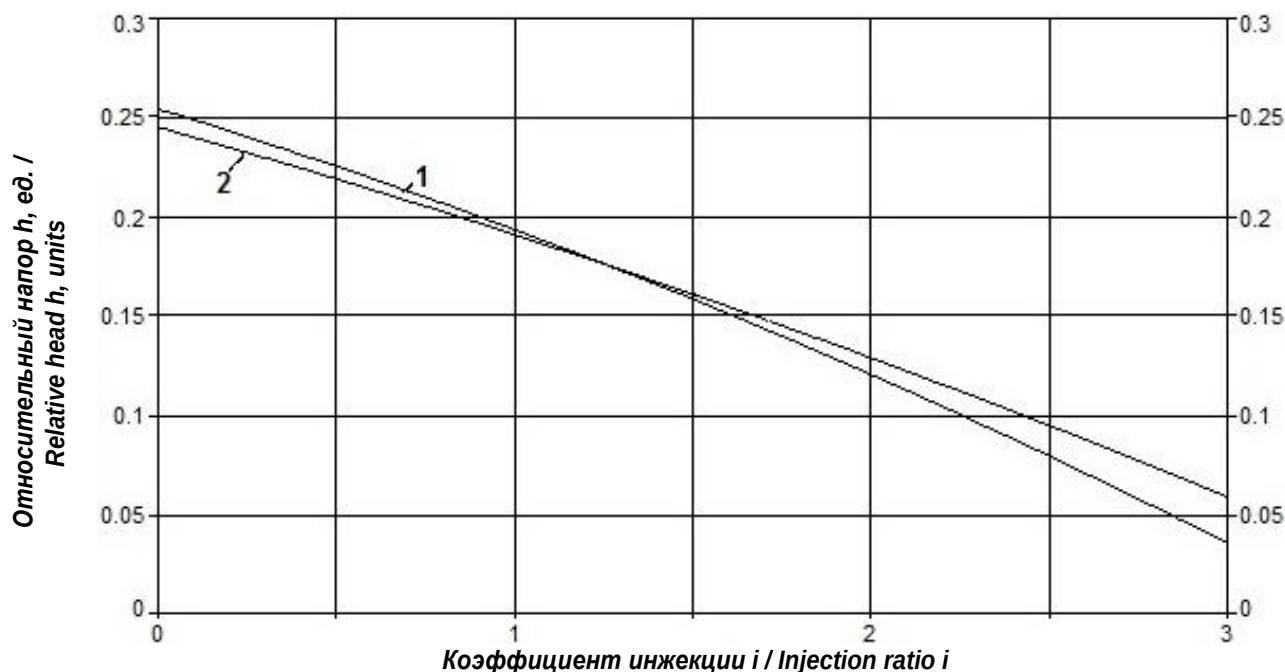


Рис. 3. Относительная характеристика струйного насоса ($K = 6,25$):
1 – характеристика по рекомендации Е.Я. Соколова; 2 – характеристика для абсолютной шероховатости проточной части $Rz = 0$ мкм

Fig. 3. Relative characteristic of the jet pump ($K = 6.25$):
1 – characteristic on E.Y. Sokolov's recommendation;
2 – characteristic for the wet end absolute roughness $Rz = 0 \mu\text{m}$



Как видно из рис. 3, кривая для шероховатости проточной части $Rz = 0$ мкм имеет незначительные отклонения от зависимости, предложенной Е.Я. Соколовым, а на интервале для коэффициентов инжекции от 1 до 1,5 практически совпадает. Поэтому характеристику струйного насоса для шероховатости проточной части $Rz = 0$ мкм можно считать теоретической.

На рис. 4 приведены характеристики струйного насоса для различных значений шероховатости его проточной части.

Анализ представленных графиков позволил построить зависимости потерь относительного напора и КПД струйного насоса при увеличении шероховатости его проточной части (рис. 5).

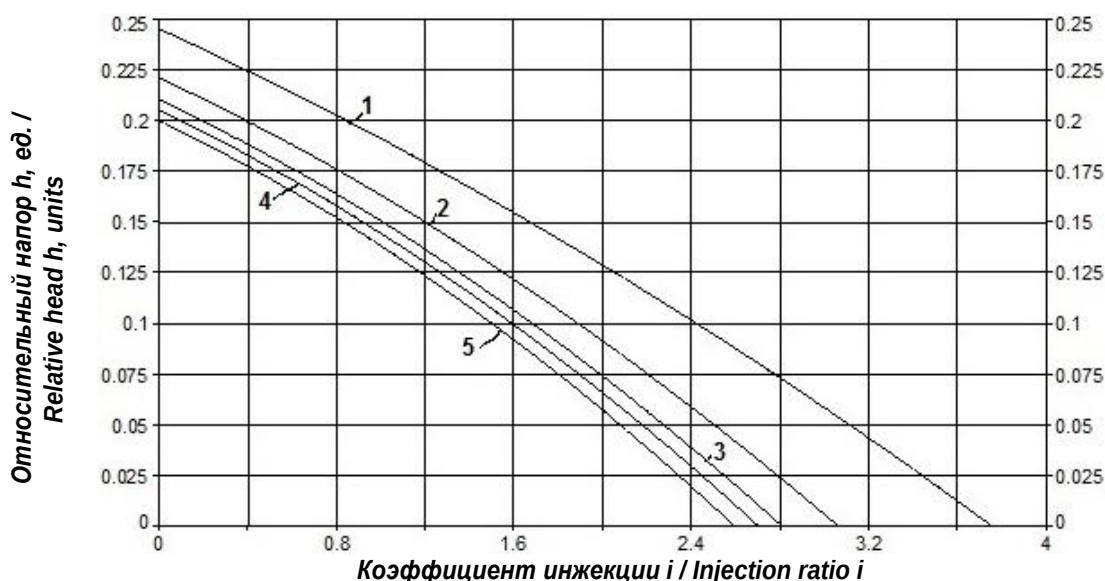


Рис. 4. Относительная характеристика струйного насоса ($K = 6,25$):
1 – $Rz = 0$ мкм; 2 – $Rz = 20$ мкм; 3 – $Rz = 60$ мкм; 4 – $Rz = 100$ мкм; 5 – $Rz = 150$ мкм
Fig. 4. Relative characteristic of the jet pump ($K = 6.25$):
1 – $Rz = 0$ μm ; 2 – $Rz = 20$ μm ; 3 – $Rz = 60$ μm ; 4 – $Rz = 100$ μm ; 5 – $Rz = 150$ μm

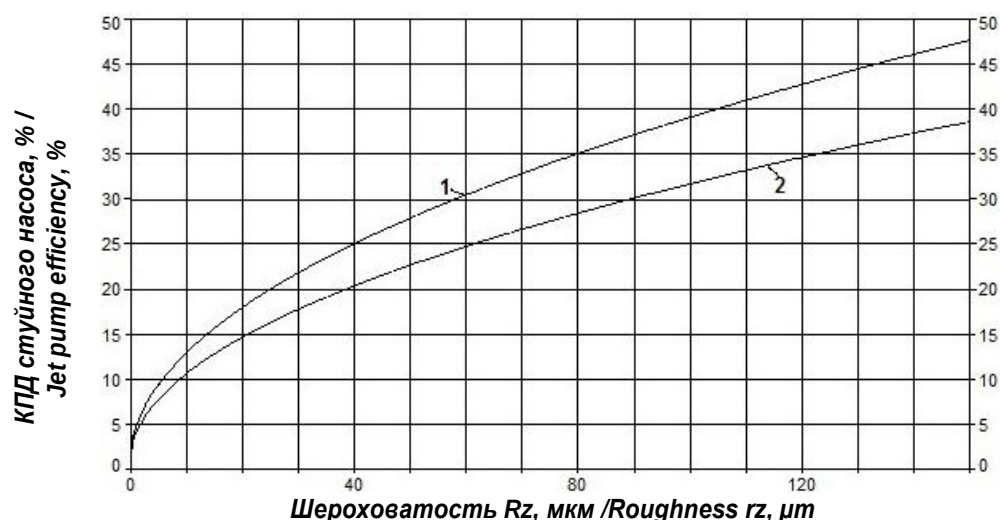


Рис. 5. Энергетические потери струйного насоса в зависимости от шероховатости его проточной части ($K = 6,25$):
1 – потери КПД; 2 – потери напора
Fig. 5. Jet pump energy losses depending on its wet end roughness ($K = 6.25$):
1 – efficiency losses; 2 – head losses



Проанализировав рис. 5, можно сделать вывод о том, что уменьшение шероховатости и повышение износостойкости поверхностей проточной части струйного

насоса в процессе изготовления позволит значительно повысить эффективность работы струйного насоса в условиях бурения нефтегазовых скважин.

Заключение

Авторами настоящей статьи впервые разработана математическая модель струйного насоса с учетом шероховатости элементов его проточной части. Ее использование в дальнейшем позволит исследовать влияние геометрических и технологических отклонений на характеристики дан-

ного скважинного гидравлического устройства и предложить общие принципы создания математических моделей работы эжекторной системы, предназначенной для повышения эффективности сооружения нефтегазовых скважин.

Библиографический список

1. Султанов Б.З. Управление устойчивостью и динамикой бурильной колонны. М.: Недра, 1991. 208 с.
2. Мельников А.П., Буглов Н.А. Эжекторное устройство для первичного вскрытия продуктивного горизонта // Вестник ИргТУ. 2015. № 12 (107). С. 75–79.
3. Мельников А.П., Паневник А.В. Эксплуатация струйных насосов на буровых предприятиях нефтегазовой отрасли // Нефтяное хозяйство. 2014. № 4. С. 46–47.
4. Яремийчук Р.С. Создание депрессий на пласт с помощью струйных аппаратов // Нефтяное хозяйство. 1981. № 11. С. 12–14.

5. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1970. 416 с.
6. Кирилловский Ю.Л., Подвидз Л.Г. Рабочий процесс и основы расчета струйных насосов // Труды ВИГМ. Исследования гидромашин. 1960. Вып. 26. С. 96–135.
7. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 3-е изд., перераб., 1989. 352 с.
8. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. [и др.]. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы; 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.

References

1. Sultanov B.Z. *Upravlenie ustoichivost'yu i dinamikoj buril'noi kolony* [Controlling drill string stability and dynamics]. Moscow: Nedra Publ., 1991, 208 p. (In Russian)
2. Mel'nikov A.P., Buglov N.A. Ejector device for production horizon primary opening. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 12 (107), pp. 75–79. (In Russian)
3. Mel'nikov A.P., Panevnik A.V. Operation of jet pumps for the oil & gas drilling industry. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil Industry]. 2014, no. 4, pp. 46–47. (In Russian)
4. Yaremiichuk R.S. Pressure draw-down production by jet devices. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil Industry]. 1981, no. 11, pp. 12–14. (In Russian)
5. Kamenev P.N. *Gidroelevatory v stroitel'stve* [Hydraulic elevators in civil engineering]. Moscow: Stroizdat Publ., 1970, 416 p. (In Russian)

6. Kirillovskii Yu.L., Podvidz L.G. Operation and calculation bases of jet pumps. *Trudy VIGM. Issledovaniya gidromashin* [Proceedings of All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering. Studies of Hydromachinery]. 1960. Issue 26, pp. 96–135. (In Russian)
7. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. *Struinye apparaty* [Jet devices]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 352 p. (In Russian)
8. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. [et al]. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivedy* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1982, 423 p. (In Russian)

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 30.11.2017 г.

The article was received 30 November 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.7.011

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37>

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ РОЛИКАМИ РАЗНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© Нго Као Кыонг¹, С.А. Зайдес², Лэ Хонг Куанг³

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Изучить влияние кинематики деформирования на характеристики качества поверхностного слоя упрочненных деталей: шероховатость, остаточные напряжения, глубина наклепа, твердость и микротвердость. **МЕТОДЫ.** Экспериментально определены характеристики поверхностного слоя упрочненных деталей на современном оборудовании: профилограф-профилометр модели Form Talysurf i200, твердомер модели HBRV 187,5, микротвердомер марки ПМТ-3, прибор Xstress 3000 G3/G3R, металлографический микроскоп марки MET-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. В результате экспериментальных исследований было установлено, что поверхностное пластическое деформирование (ППД) двухрадиусным роликом по сравнению с однорадиусным имеет ряд преимуществ в отношении качества упрочненного слоя. Так, шероховатость поверхности снижается в 3–3,5 раза, твердость поверхностного слоя повышается на 6–8%, остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое возрастают в 1,2–1,5 раза. **ВЫВОДЫ.** Результаты экспериментальных исследований позволяют выбрать способ упрочнения для получения заданных характеристик качества поверхностного слоя деталей машин. Полученные результаты дают основание для разработки комбинированных способов ППД, обеспечивающих получение высокого качества поверхностного слоя по ряду показателей.

Ключевые слова: двухрадиусный ролик, деформационное упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, качество поверхностного слоя, шероховатость, твердость, остаточное напряжение.

Формат цитирования: Нго Као Кыонг, Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка качества упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании роликами разных конструкций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 30–37. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-30-37

HARDENED LAYER QUALITY EVALUATION AT SURFACE PLASTIC DEFORMATION BY ROLLERS OF DIFFERENT DESIGNS

Ngo Cao Cuong, S.A. Zaides, Le Hong Quang

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is to study the influence of deformation kinematics on the quality characteristics of the hardened part surface layer including roughness, residual stresses, mechanical hardening depth, hardness and microhardness. **METHODS.** The characteristics of the surface layer of hardened parts have been experimentally determined using modern equipment: a profilograph-profilometer Form Talysurf i200, a hardness tester HBRV 187.5, a microhardness meter PMT-3, a device Xstress 3000 G3/G3R, a metallographic microscope MET-2. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The experimental studies allowed to find out that surface plastic deformation by a two-radius roller has a number of advantages in the quality of the hardened layer as compared with a single radius roller. For example, surface roughness decreases by 3–3.5 times, surface layer hardness increases by 6–8%, residual compressive stresses in the surface layer increase by 1.2–1.5 times. **CONCLUSIONS.** The results of experimental studies allow to choose the method of hardening in order to obtain specified quality characteristics of the surface layer of machine parts. The obtained results can serve the basis for the development of combined methods of surface plastic deformation ensuring high quality of the surface layer by a number of parameters.

Keywords: two-radius roller, deformation hardening, surface plastic deformation, surface layer quality, roughness, hardness, residual stress

¹Нго Као Кыонг, аспирант, e-mail: cuong.istu@gmail.com

Ngo Cao Cuong, Postgraduate, e-mail: cuong.istu@gmail.com

²Зайдес Семен Азикович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов, e-mail: zsa@istu.edu

Semen A. Zaides, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Materials, e-mail: zsa@istu.edu

³Лэ Хонг Куанг, аспирант, e-mail: cuong.istu@gmail.com

Le Hong Quang, Postgraduate, e-mail: cuong.istu@gmail.com



For citation: Ngo Cao Cuong, Zaides S.A., Le Hong Quang. Hardened layer quality evaluation at surface plastic deformation by rollers of different designs. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 30–37. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-30-37

Введение

Для повышения долговечности различных деталей в промышленности широко применяют технологии поверхностного пластического деформирования (ППД). Отделочно-упрочняющие методы обработки ППД просты в реализации, экономичны, производительны. Они обеспечивают формирование низкой шероховатости, заданную глубину и степень упрочнения поверхностного слоя, остаточные напряжения сжатия в поверхностных слоях, мелкозернистость структуры и других показателей качества поверхностного слоя обработанных деталей [1–3].

ППД традиционно осуществляется локальным деформирующим инструментом (шарик, ролик, диск, алмазный индентор и др.). Пластическое локальное воздействие позволяет выполнять отделочно-упрочняющую обработку разнообразных деталей простых и сложных форм.

Однако технология, предлагаемая для обработки ППД жестких валов (валов большого диаметра и малой длины), иногда не может быть использована для упрочнения мало жестких валов без существенного увеличения жесткости технологической системы, создания специальных инструментов и оборудования. При пласти-

ческом деформировании деталей малой жесткости (тонкостенные, длинномерные детали) возможности локальных методов упрочнения ограничены. Это связано с малой изгибной жесткостью заготовки, вибрациями в механической системе, сложностью достижения заданного качества изделия, точности и производительности обработки, а также с отсутствием необходимого технологического оборудования. Пластическая деформация только поверхностного слоя вызывает значительные деформации и перемещения частиц металла, что отрицательно сказывается на геометрии изделия [4].

Вопросы интенсификации напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при ППД рассмотрены в работах [5, 6]. При этом установлена существенная эффективность предложенных решений. Однако оценка качества упрочненного слоя осталась под вопросом. Поэтому целью данной работы является исследование качества упрочненного слоя при использовании новой технологической схемы ППД и сравнение экспериментальных результатов с данными, полученными при обработке деталей обычным цилиндрическим однорадиусным роликом.

Физические особенности деформационного упрочнения

Согласно современной дислокационной теории, основные механизмы упрочнения, обеспечивающие повышение напряжения пластического течения, можно классифицировать на основе геометрических размеров «препятствий», тормозящих движение дислокаций (элементы субструктуры, границы зерен, растворенные атомы, дислокации, дисперсные частицы) [7]. Наиболее эффективное упрочнение сталей и сплавов может быть реализовано путем целенаправленных технологических воздействий на структуру металлов для уве-

личения плотности дислокаций и создания дислокационной субструктуры для увеличения сопротивления сдвига упрочняемого материала.

Таким образом, пути повышения прочностных свойств сплавов и сталей заключаются в разработке упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование такого структурного состояния материала, при котором максимально реализуются основные принципы дислокационной теории упрочнения. Интенсификация напряженно-деформированного состояния может быть достигнута, если



будет усилено деформационное искажение зерен материала. Отсюда вытекает технологическая задача: необходимо создать такую конструкцию и кинематику рабочего локального инструмента, которые при по-

верхностном пластическом деформировании усиливали бы искажение структуры материала при сохранении качества поверхностного слоя.

Конструкция локального инструмента

В практике ППД известно и широко используют локальные упрочняющие методы обкатки деталей цилиндрическим роликом. Процесс локального ППД представлен цилиндрическим роликом, вращающимся относительно горизонтальной оси. Перемещаясь в осевом направлении по поверхности вращающегося цилиндрического образца, деформирующий ролик создает винтовую траекторию пластического следа на обрабатываемой поверхности. С точки зрения деформационного искажения микроструктуры обработка является малоэффективной.

Техническая идея по интенсификации напряженного состояния в очаге деформации заключается в изменении кинематики рабочего инструмента, которая должна усиливать искажение зеренной структуры материала. Новый способ ППД наружных цилиндрических поверхностей деталей машин отличается тем, что де-

формирующий элемент инструмента является индентором с двумя рабочими профильными радиусами. При этом инструменту дополнительно сообщают вращательное движение относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющую два ролика и расположенную перпендикулярно к оси заготовки.

При вращении ролика вокруг диаметральной оси происходит наложение пластических полей разных ориентаций по направлению, что должно способствовать искажению, «перемешиванию» структуры в поверхностном слое, в итоге эффективность упрочняющей обработки должна быть еще выше. Способ упрочнения поясняется чертежом: на рис. 1 представлена схема данного способа обработки для поверхностного пластического деформирования цилиндрической заготовки и конструкция рабочей части ролика, реализующего данный способ.

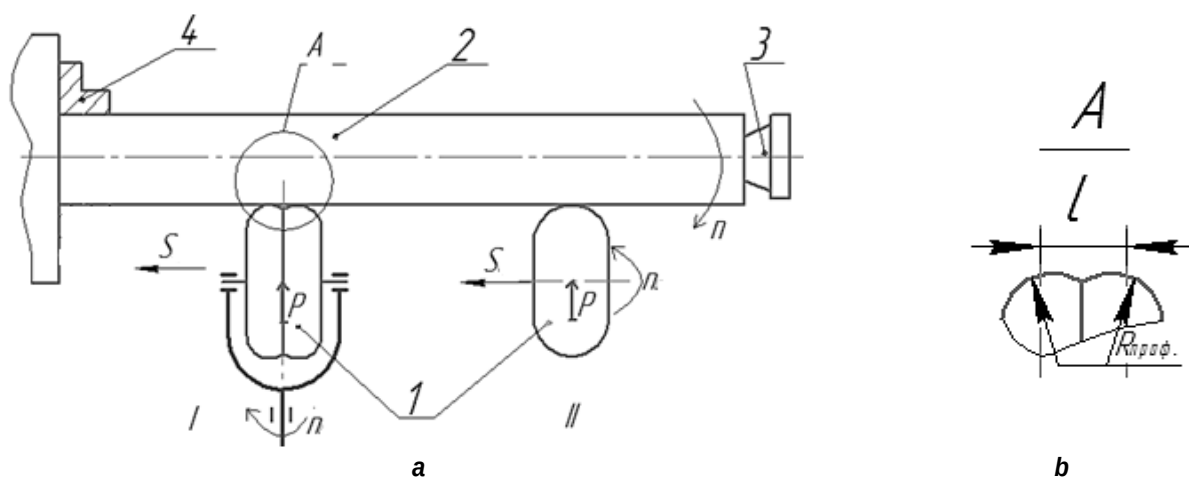


Рис. 1. А – схемы упрочняющей обработки двухрадиусным (I) и однорадиусным роликом (II) на токарном станке; б – вид рабочей части двухрадиусного ролика:

1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – задняя бабка; 4 – трехкулачковый патрон
Fig. 1. А – Schemes of hardening machining by two-radius (I) and one-radius roller (II) on the lathe;
б – view of the working part of the two-radius roller:
1 – tool; 2 – workpiece; 3 – tailstock; 4 – three-jaw chuck



Методика экспериментальных исследований

Исследования проведены на цилиндрических образцах диаметром 18 мм, изготовленных из стали 45 на токарном станке 1К62. Для локального упрочнения использовали однорадиусный цилиндрический ролик из стали У10А диаметром 30 мм с радиусом профиля $R = 5$ мм. В качестве технологической смазки использовали масло И-40А. Режим обработки: подача инструмента $s = 0,21$ мм/об.; глубина внедрения ролика (натяг) – 0,1 мм; частота вращения заготовки $n = 125$ мин⁻¹.

Обкатывание двухрадиусным роликом выполнено на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 (Германия) также с глубиной внедрения 0,1 мм. Подача и частота вращения инструмента приняты соответственно: $s = 0,21$ мм/об.; $n_3 = 25$ мин⁻¹; $n_{unc} = 1200$ мин⁻¹. Смазка – масло И-40А. Двухрадиусный ролик изготовлен из стали У10А с профильным радиусом $R_{пр} = 3$ мм, $l = 2$ мм.

Измерение параметров шероховатости после упрочнения ППД проводили с помощью профилографа-профилометра модели Form Talysurf i200 производства фирмы Taylor Hobson (Англия) с применением индуктивного и лазерного интерферометрического датчиков. Прибор способен измерять отклонения формы в пределах ограниченной поверхности, волнистость, направления неровностей, изъяны поверхности, а также параметры шероховатости, в том числе соответствующие ГОСТ 2789-73⁴.

С помощью твердомера модели HBRV 187,5 определена поверхностная твердость по Роквеллу стальным шариком диаметра 1,588 мм (HRB). Твердость по Роквеллу определена по глубине вдавливания наконечника. Вдавливанию производили под действием двух последовательно приложенных нагрузок – предварительной, равной 100 Н, и окончательной (общей),

равной 980 Н. Твердость определяли по разности глубин вдавливания отпечатков. Глубина отпечатка под действием основной нагрузки фиксируется индикатором, а твердость по HRB после измерения отсчитывается на экране твердомера.

Для определения микротвердости использован микротвердомер марки ПМТ-3 с усилием нагружения 200 г. При испытании измеряли диагональ отпечатка d и по соответствующим таблицам (для заданной нагрузки P) получили микротвердость H_μ , Н/мм².

Для измерения остаточных напряжений использовали прибор Xstress 3000 G3/G3R. Режим измерения: хромовый анод; К- α -излучение; напряжение на рентгеновской трубке – 25 кВ; сила тока – 5,5 мА; коллиматор размером 5 мм; угол дифракции – 156,4°; плоскость отражения – 311; количество наклонов – 8; отклонение наклона (осцилляция) – $\pm 5^\circ$; время экспозиции – 5 с. Измерение напряжений (φ) проводили в двух направлениях – 0° (положение гониометра вдоль образца) и 90° (положение гониометра поперек образца). Нормальные напряжения определяли одним из стандартных способов обсчета пиков Peakfit, предлагаемых программным обеспечением прибора. Для автоматизированного расчета напряжений вводили параметры материала: модуль Юнга – 210 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3.

Для исследования микроструктуры металла использован металлографический микроскоп марки МЕТ-2, предназначенный для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом поле, а также для исследования объектов в поляризованном свете. Образцы подготовлены и залиты в формы на прессе марки Полилаб С50А. Образцы шлифовали наждачной бу-

⁴ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Стандартиформ, 2006 / GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics. Moscow: Standartinform Publ., 2006.



магой различной зернистости, травили спиртом и 5%-ной азотной кислотой. Струк-

тура металла была сфотографирована с помощью программы Tour View.

Результаты эксперимента

Далее показано влияние приведенных схем упрочнения на основные характеристики качества поверхностного слоя: шероховатость, поверхностную твердость, остаточные напряжения, микроструктуру и глубину наклепа.

Шероховатость. Профилограмма шероховатости при обкатке двухрадиусным и однорадиусным роликами показана на рис. 2, из которого видно, что высота и степень заполнения впадин микронеровностей имеют лучшие результаты при обработке двухрадиусным роликом. На рис. 3 представлена зависимость показателей шероховатости от схемы обработки. Величины показателей шероховатости перед упроч-

нением образцов имели следующие значения:

$Ra = 1,7$ мкм, $Rz = 13$ мкм. После обкатки однорадиусным роликом величины Rz и Ra снижаются в 2 и 2,2 раза соответственно, а при обкатке двухрадиусным роликом Rz – в 2,9 раз, Ra – в 3,5 раза.

Поверхностная твердость. На рис. 4 показана зависимость поверхностной твердости от способа обработки. При обкатке двухрадиусным роликом поверхностный слой деформируется многократно и в большей мере, чем при обкатке однорадиусным роликом. В результате твердость увеличивается соответственно на 9,4 и 3,5% по сравнению с исходной твердостью.

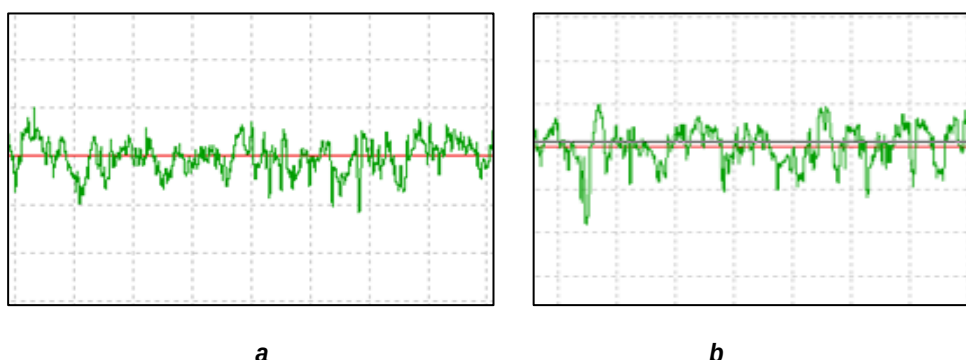


Рис. 2. Профилограммы шероховатости при обкатке двухрадиусным (а) и однорадиусным роликом (б)

Fig. 2. Profilograms of roughness when rolling with two-radius (a) and one-radius roller (b)

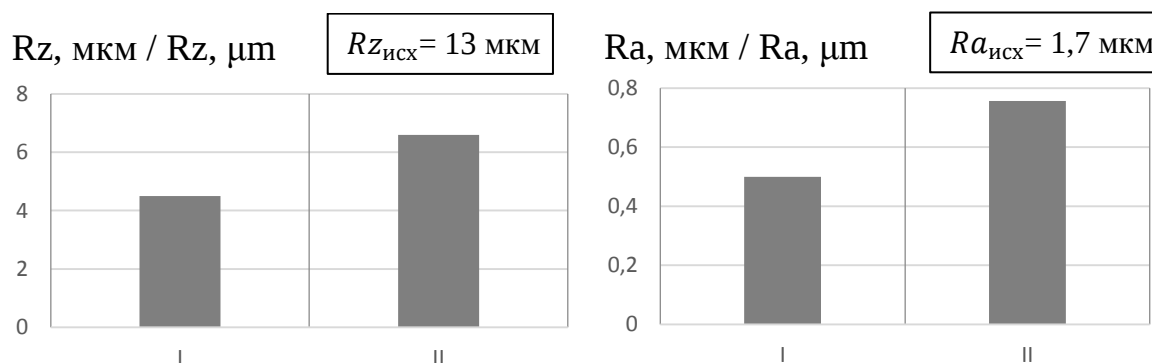


Рис. 3. Зависимость показателей шероховатости от способа обработки:

I – обкатка двухрадиусным роликом; II – обкатка однорадиусным роликом

Fig. 3. Roughness dependence on machining method: I – two-radius roller machining, II – one-radius roller machining

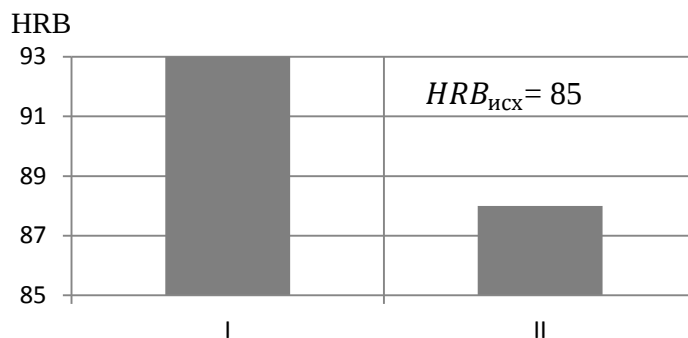


Рис. 4. Поверхностная твердость в зависимости от способов обработки:
I – обкатка двухрадиусным роликом; II – обкатка однорадиусным роликом
Fig. 4. Surface hardness depending on machining methods: I – two-radius roller machining;
II – one-radius roller machining

Остаточные напряжения. Результаты измерения остаточных напряжений рентгеновским способом показаны на рис. 5, из которого видно, что остаточные осевые напряжения имеют большие значения, чем остаточные тангенциальные. При обкатке двухрадиусным и однорадиусным роликами в поверхностных слоях формируются остаточные напряжения сжатия. При этом отношение осевых и тангенциальных напряжений составляет 1,7–2, что согласуется с литературными данными [8]. При обкатке двухрадиусным роликом значение поверхностных остаточных напряжений повышается в 1,2–1,5 раза по сравнению с обкаткой однорадиусным роликом.

Микроструктура. Снимки микроструктуры на краю упрочненной зоны пред-

ставлены в таблице (черные зерна – перлит, белые – феррит).

Рассмотренные способы упрочнения влияют на изменение микроструктуры в поверхностном слое. После обработки ППД зерна вытягиваются в продольном направлении интенсивнее, чем в поперечном. При этом наблюдается измельчение зерен, разрушение их границ и образование текстуры. Исходная структура с средним размером зерен составляла 22 мкм. При обкатке двухрадиусным роликом размеры зерен уменьшаются соответственно на 78,5% в продольном и на 64,6% в поперечном направлении. При обкатке однорадиусным роликом размеры зерен уменьшаются на 65,7% в продольном и на 46% в поперечном направлении.

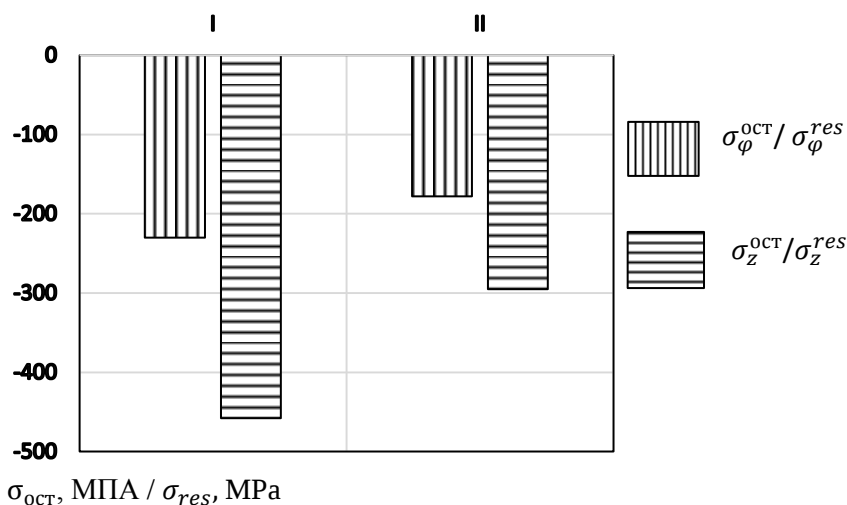
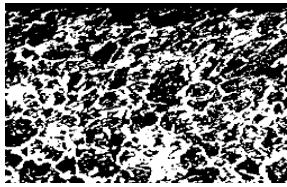
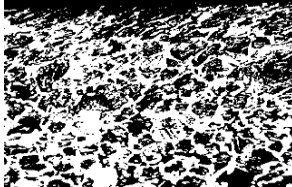
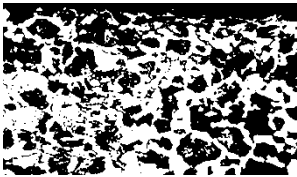
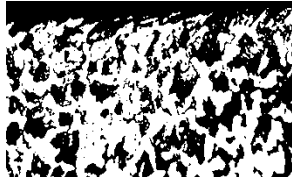


Рис. 5. Остаточные напряжения на цилиндрической поверхности при различных схемах обработки:
I – обкатка двухрадиусным роликом; II – обкатка однорадиусным роликом
Fig. 5. Residual stresses on the cylindrical surface under different machining schemes:
I – two-radius roller machining; II – one-radius roller machining



**Микроструктура упрочненных образцов после обработки разными способами
(увеличение $\times 1000$)**

**Microstructure of hardened samples after different machining methods
(thousandfold magnification)**

Способ обработки / Machining method	Поперечное сечение / Cross section	Продольное сечение / Longitudinal section
Обкатка двухрадиусным роликом / Two-radius roller machining		
Обкатка однорадиусным роликом / One-radius roller machining		

Микротвердость и глубина наклепа. На рис. 6 показано распределение микротвердости по поперечному сечению в зависимости от способов обработки.

Локальный процесс упрочнения двухрадиусным роликом по сравнению с обкаткой однорадиусным роликом позволяет получить больший градиент изменения и значение микротвердости, но меньшую глубину пластической зоны.

По результатам экспериментальных исследований выявлено, что качество поверхностного слоя существенно зависит от способов поверхностного пластического деформирования. Выбор способа ППД и назначение режимов обработки необходимо осуществлять в зависимости от технических требований к поверхностным слоям деталей.

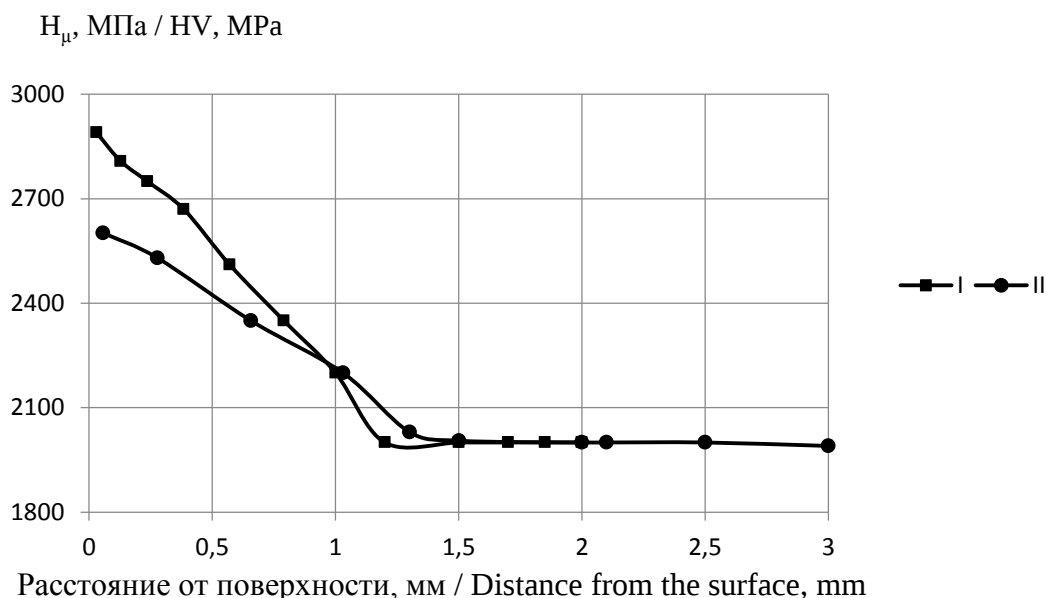


Рис. 6. Распределение микротвердости по поперечному сечению образцов в зависимости от способов обработки: I – обкатка двухрадиусным роликом; II – обкатка однорадиусным роликом
Fig. 6. Microhardness distribution over the cross section of samples depending on machining methods: I – two-radius roller machining; II – one-radius roller machining



Выводы

В результате экспериментальных исследований было установлено, что поверхностное пластическое деформирование двухрадиусным роликом, по сравнению с однорадиусным, имеет ряд преимуществ в отношении качества упрочненного слоя. Так, шероховатость поверхности снижается в 3–3,5 раза, твердость поверхностного слоя повышается на 6–8%, остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое возрастают в 1,2–1,5 раза. Следует отме-

тить, что при упрочнении двухрадиусным роликом глубина наклепанного слоя несколько ниже.

Полученные результаты позволяют выбрать способ упрочнения для получения заданных характеристик качества поверхностного слоя деталей машин, а также дают основание для разработки комбинированных способов ППД, обеспечивающих получение высокого качества поверхностного слоя по ряду показателей.

Библиографический список

1. Инженерия поверхности деталей. Колл. авторов; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
3. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
4. Зайдес С.А., Емельянов В.Н., Попов М.Е. Деформирующая обработка валов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 452 с.
5. Зайдес С.А., Нго К.К. Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки

- поверхностным пластическим деформированием // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 3. С. 25–30.
6. Зайдес С.А., Нго К.К. Повышение напряженного состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании цилиндрических деталей // Известие высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 5. С. 52–59.
7. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. М.: Машиностроение, 2003. 384 с.
8. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

References

1. *Inzheneriya poverhnosti detalej* [Part surface engineering]. A.G. Suslov, V.F. Bezjazychnyj, Ju.V. Panfilov i dr. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008, 320 p. (In Russian)
2. *Suslov A.G. Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalej mashin* [Quality of machine part surface layer]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2000. 320 p. (In Russian)
3. *Blyumenshtein V.Yu., Smelyanskii V.M. Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Mechanics of technological inheritance at the stages of machine part processing and operation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2007, 399 p. (In Russian)
4. *Zaides S.A., Emelyanov V.N., Popov M.E. Deformiruyushchaya obrabotka valov* [Deformation machining of shafts]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2013. 452 p. (In Russian)
5. *Zaides S.A., Ngo K.K. New technological potentialities of finish-strengthening by surface plastic deformation. Nauchnye tekhnologii v mashinostroyeni*. [Science inten-

- sive technologies in mechanical engineering]. 2017, no. 3, pp. 25–30. (In Russian)
6. *Zaides S.A., Ngo K.K. Increasing the stress state in the deformation zone for cylindrical parts under surface plastic deformation. Izvestie vysshih uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2017, no. 5, pp. 52–59. (In Russian)
7. *Prihod'ko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. Metallofizicheskie osnovy razrabotki uprochnyayushchikh tekhnologii*. [Metal-physical basis for hardening technology development]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003, 384 p. (In Russian)
8. *Smelyanskii V.M. Mekhanika uprochneniya detalei poverkhnostnym plasticheskim de-formirovaniem* [Mechanics of part hardening by surface plastic deformation]. Moscow: Machine Building Publ., 2002, 300 p. (In Russian)

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 20.11.2017 г.

The article was received 20 November 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 621-027.31

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-38-46>

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СМЕСИТЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С МЕХАНИЗМОМ ОСЦИЛЛЯЦИИ

© Ю.И. Подгорный¹, В.Ю. Скиба², Т.Г. Мартынова³, И. Д. Дюбанова⁴, А. И. Тертова⁵,
А.А. Чернышева⁶

¹⁻⁶Новосибирский государственный технический университет,
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-кт Карла Маркса, 20.

¹Новосибирский технологический институт (филиал) «МГУДТ»,
Российская Федерация, 630099, г. Новосибирск, ул. Потанинская, 5.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В промышленности, строительстве и сельском хозяйстве широко эксплуатируется перемешивающее технологическое оборудование непрерывного действия. Для повышения качества смесей в некоторых смесителях наряду с вращательным применяется возвратно-поступательное движение рабочих органов (осцилляция). Целью данной работы является выявление возможности повышения производительности таких агрегатов за счет увеличения их кинематических параметров. **МЕТОДЫ.** В ходе исследования разработана расчетная схема двухвального смесителя, позволившая провести математическое моделирование кинематических и силовых параметров механизма. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В работе проведен анализ взаимосвязи кинематических, динамических и геометрических параметров механизма смесителя, получены зависимости осевой и тангенциальной нагрузок от отношения скоростей, а также осевой скорости и ускорения от отношения скоростей.

ВЫВОДЫ. Осевая скорость имеет наибольшее значение при угле поворота эксцентрика 180°, а ускорение – при 120 или 240°. Для снижения динамических нагрузок на рабочие органы необходимо использовать такие скоростные режимы, при которых ускорение меняется незначительно, т.е. в интервале отношения скоростей от 0 до 0,2. Результаты проведенных исследований показали, что увеличение отношения осевой и тангенциальной скоростей приводит к увеличению тангенциальной и уменьшению осевой нагрузки на лопасти рабочих валов.

Ключевые слова: смеситель непрерывного действия, осцилляция, кинематические параметры, динамические параметры, математическое моделирование, осевая скорость, тангенциальная скорость.

Формат цитирования: Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г., Дюбанова И.Д., Тертова А.И., Чернышева А.А. Повышение производительности смесителей непрерывного действия с механизмом осцилляции // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 38–46.
DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-38-46

IMPROVING EFFICIENCY OF CONTINUOUS MIXERS WITH AN OSCILLATION MECHANISM

Yu.I. Podgorny, V.Yu. Skeebe, T.G. Martynova, I.D. Dyubanova, A.I. Tertova, A.A. Chernysheva

Novosibirsk State Technical University,
20 K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russian Federation

¹Подгорный Юрий Ильич, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования технологических машин, e-mail: pjui@mail.ru

Yuri I. Podgorny, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Industrial Machinery Design, e-mail: pjui@mail.ru

²Скиба Вадим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования технологических машин, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Vadim Yu. Skeebe, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Machinery Design, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

³Мартынова Татьяна Геннадьевна, кандидат технических наук, кафедры проектирования технологических машин, e-mail: tatyana martynova1511@gmail.com

Tatiana G. Martynova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Machinery Design, e-mail: tatyana martynova1511@gmail.com

⁴Дюбанова Ирина Дмитриевна, студентка, e-mail: ira_dyubanova@mail.ru

Irina D. Dyubanova, Student, e-mail: ira_dyubanova@mail.ru

⁵Тертова Анна Игоревна, студентка, e-mail: anyashevchenko96@mail.ru

Anna I. Tertova, Student, e-mail: anyashevchenko96@mail.ru

⁶Чернышева Анна Алексеевна, магистрант, e-mail: anna200@i.ua

Anna A. Chernysheva, Master's degree student, e-mail: anna200@i.ua



Novosibirsk Technological Institute (branch of Moscow State University of Design and Technology),
5 Potaninskaya St., Novosibirsk 630099, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. Continuous mixing technological equipment is widely used in industry, construction engineering and agriculture. Some mixers alongside with rotatory motion of actuators also employ reciprocating motion (oscillation) in order to improve the quality of mixtures. The purpose of this work is to identify the possibility of improving these machines performance through increasing their kinematic parameters. **METHODS.** A design model of a two-shaft mixer has been developed in the course of study. It allowed to perform a mathematical modeling of kinematic and power parameters of the mechanism. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The relationships between the kinematic, dynamic and geometric parameters of the mixer mechanism are analyzed. The dependences of axial and tangential loads on the ratio of velocities, as well as axial velocity and acceleration on the ratio of velocities are obtained. **CONCLUSIONS.** The axial velocity has the greatest value when the rotation angle of the eccentric equals 180° and the acceleration is 120° or 240° . To reduce actuator's dynamic loads it is necessary to use such high-speed modes, under which the acceleration varies insignificantly, i.e. in the interval of the velocity ratio from 0 to 0.2. The study results show that the increase in the ratio of axial and tangential velocities increases the tangential load and decreases the axial load on the working shaft blades.

Keywords: continuous mixer, oscillation, kinematic parameters, dynamic parameters, mathematical modeling, axial velocity, tangential velocity

For citation: Podgorny Yu.I., Skeebe V.Yu., Martynova T.G., Dyubanova I.D., Tertova A.I., Chernysheva A.A. Improving efficiency of continuous mixers with an oscillation mechanism. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 38–46. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-38-46

Введение

В различных отраслях промышленности, строительства и сельского хозяйства широкое распространение получило технологическое оборудование, предназначенное для изготовления различных смесей. На многих крупных предприятиях в автоматических линиях используются смесители непрерывного действия с двумя рабочими валами [1]. Такое оборудование эффективно применять для получения сыпучих смесей [2].

Рабочая камера двухвального смесителя обычно выполняется в виде ванны, в которой горизонтально расположены два рабочих вала, вращающихся в противоположных направлениях. На валах установлены лопатки. Загрузка исходных компонентов осуществляется через загрузочное отверстие, расположенное с одной стороны рабочей камеры в верхней ее части, и в процессе перемешивания смесь продвигается к разгрузочному устройству, расположенному в противоположной стороне рабочей камеры (рис. 1).

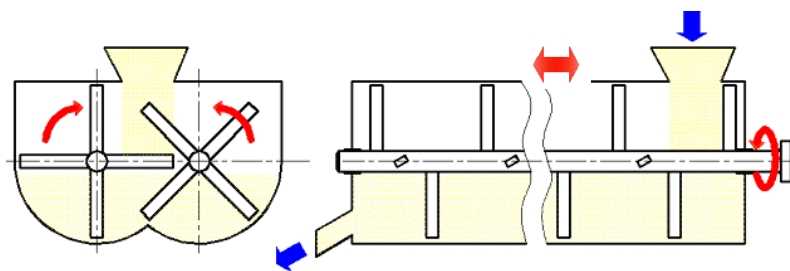


Рис. 1. Принципиальная схема смесителя непрерывного действия
Fig. 1. Schematic diagram of a continuous mixer

Проблемам исследования механизмов смесителей и методикам их проектирования посвящены работы О.В. Демина, А.Б. Шушпанникова, П.И. Огородникова и др., а в области макаронного производства – М.Е. Чернова, А.И. Драгилева и др. Исследователями выявлен ряд факторов, влияющих на технические, технологические и конструктивные характеристики смесителей для сыпучих материалов, но предлагаемые ими методики расчетов не учитывают возвратно-поступательного движения рабочих органов.

Целью данной работы является выявление возможности повышения производительности смесителя при наличии возвратно-поступательного движения рабочих валов. В соответствии с данной целью были поставлены следующие задачи:



- разработать расчетную схему двухвального смесителя;
- провести математическое моделирование кинематических и силовых параметров механизма смесителя;
- провести анализ взаимосвязи кинематических, динамических и геометрических параметров механизма смесителя.

Материал и методы исследования

Особенностью смесителей является большая протяженность рабочей камеры для обеспечения требуемого качества смеси, вследствие чего валы имеют большую длину при относительно малом диаметре. Отношение длины к диаметру вала находится в интервале от 30 до 50, что говорит об их малой жесткости вследствие низкой виброустойчивости. Кроме того, установка лопаток под разными углами приводит к неравномерной нагрузке по длине вала.

Еще одной особенностью является то, что для увеличения интенсивности перемешивания и устранения так называемых мертвых зон, как следствие повышения качества смеси, наряду с вращательным движением осуществляется дополнительное возвратно-поступательное движение (осцилляция) рабочих органов.

Эффективность таких смесителей может быть представлена в виде выражения [3]:

$$\Xi = \frac{\Phi_d \Pi}{3_{пр}}, \quad (1)$$

где Φ_d – действительный фонд времени, ч; Π – производительность технологического оборудования, кг/ч; $3_{пр}$ – приведенные затраты, руб.

Производительность смесителей выражается формулой [4]:

$$\Pi = 0,25nD^2 \left(\frac{L}{\tau}\right) \rho k, \quad (2)$$

где n – частота вращения вала с лопатками, мин^{-1} ; D – диаметр рабочей ванны, м; L – длина рабочей камеры, м; τ – продолжительность перемешивания, с; ρ – плотность смеси, кг/м^3 ; k – коэффициент подачи.

Проанализировав зависимость (2), можно выявить два пути повышения производительности:

- изменение геометрических размеров – увеличение объема рабочей камеры (однако это не всегда возможно, поскольку такие агрегаты чаще всего встраиваются в автоматические линии);

- увеличение скорости продвижения смеси (возможно за счет повышения частоты вращения валов, но при этом возникает ряд проблем: потеря качества смеси, повышение нагрузок на рабочие валы).

Во втором случае вопрос качества может быть решен за счет дополнительного возвратно-поступательного движения рабочих органов, позволяющего устранить мертвые зоны.

Основной же проблемой является отсутствие методики расчета основных параметров смесителей с дополнительным осцилляционным движением рабочих органов. Поэтому существуют трудности при расчете конструкции смесителя на прочность и расчете его мощности, необходимой для смешивания компонентов. При этом мощность $N_{эл}$, Вт, может быть рассчитана в соответствии с выражением [5]

$$N_{эл} = \frac{(P_r V_r + P_o V_o) z}{\eta}, \quad (3)$$



где P_m – тангенциальная составляющая равнодействующих сил, действующих на лопатку, Н; P_o – осевая составляющая равнодействующих сил, действующих на лопатку, Н; V_m – тангенциальная скорость, м/с; V_o – осевая скорость, м/с; z – число лопаток; η – КПД привода.

Тангенциальная и осевая скорости находятся по формулам:

$$V_T = 2\pi nR; \quad (4)$$

$$V_o = V_T i, \quad (5)$$

где R – радиус вращения центра плоскости лопатки, м; i – передаточное отношение.

Однако суть этой проблемы заключается в том, что существующие методы расчета технологической нагрузки справедливы только для смесителей с вращательным движением рабочих органов. В связи с этим для исследуемых смесителей аналитическим путем были получены следующие расчетные зависимости:

$$P_T = F \left[gR\rho t g^2 \left(45 + \frac{\gamma}{2} \right) + 2Ctg \left(45 + \frac{\gamma}{2} \right) \right] \cdot [\cos(\alpha - \delta) + \mu \sin(\alpha - \delta)]; \quad (6)$$

$$P_o = F \left[gR\rho t g^2 \left(45 + \frac{\gamma}{2} \right) + 2Ctg \left(45 + \frac{\gamma}{2} \right) \right] \cdot [\sin(\alpha - \delta) - \mu \cos(\alpha - \delta)], \quad (7)$$

где F – площадь лопатки, погруженной в продукт, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность продукта, кг/м³; C – удельное сопротивление перемешивания продукта, Па; γ – угол внутреннего трения продукта; α – угол установки лопатки относительно радиуса, град.; μ – коэффициент трения продукта о лопатку; $\delta = \arctg \left(\frac{V_o}{V_T} \right)$ – угол вхождения лопатки в смесь, град.

Кроме отсутствия методик для определения усилий на рабочие органы таких агрегатов их расчет осложняется тем, что происходит перемещение валов в осевом направлении, вследствие чего изменяется место приложения нагрузки относительно опор, а также изменение результирующей скорости как по направлению, так и по величине, приводящее к изменению силовых характеристик (рис. 2).

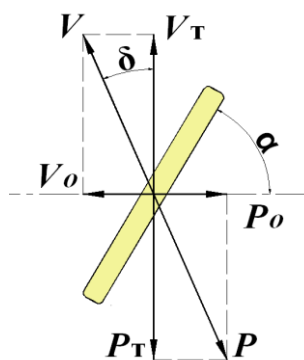


Рис. 2. Направление скоростей и технологической нагрузки на лопатку
Fig. 2. Direction of velocities and a technological load on the blade

В то же время на технологическую нагрузку оказывают влияние и физико-механические свойства смеси, в частности, удельное сопротивление перемешивания. Известно, что при простоях смесителя по различным причинам происходит оседание продукта, которое ведет к изменению этого параметра. Однако характер изменения удельного сопротивления перемешиванию неизвестен.



Исходя из выше сказанного, возникает необходимость исследовать смесители непрерывного действия с механизмом осцилляции.

Определение рациональных значений параметров, при которых могут эффективно использоваться смесители, проводится путем кинематических и силовых исследований. Для этих целей был проведен кинематический анализ механизма продольного перемещения рабочих валов смесителя, расчетная схема которого представлена на рис. 3.

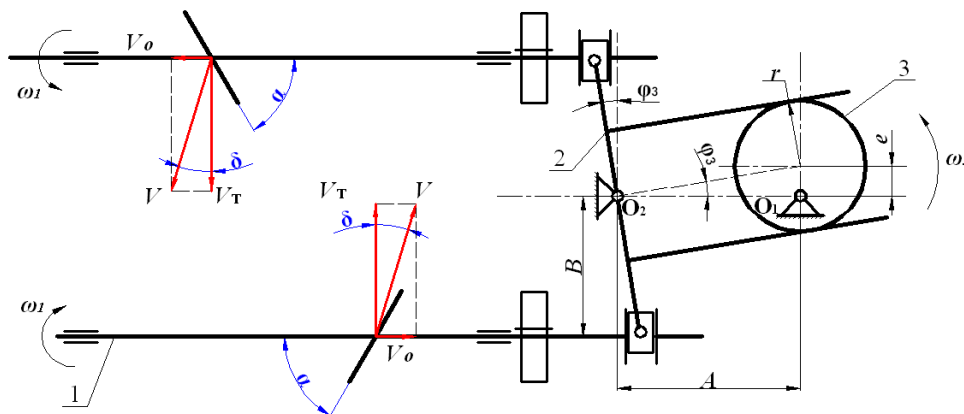


Рис. 3. Расчетная схема смесителя прессы «Кобра»:
1 – рабочий орган; 2 – система рычагов; 3 – эксцентрик
Fig. 3. Design model of the mixer press "Cobra":
1 – actuator; 2 – system of levers; 3 – eccentric shaft

Таким образом, в базовой конструкции смесителя возвратно-поступательное движение рабочих органов 1 осуществляется через систему рычагов 2 и эксцентрик 3. Вращательное движение валов 1 передается от двигателя через зубчатые колеса, поэтому тангенциальная скорость лопаток при установившейся работе агрегата постоянна. То есть к кинематическим параметрам, подлежащим определению, относятся путь, скорость и ускорение рабочих валов в осевом направлении. Для этого необходимо выявить их взаимосвязь с геометрическими параметрами механизма.

Путь S , пройденный валом в осевом направлении в первом приближении, можно найти из выражения

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{S}{B}, \quad (8)$$

где φ_3 – угол поворота рычага при развороте эксцентрика на угол φ , град; B – расстояние от оси вращения рычагов до оси вращения валов, м.

С другой стороны, угол φ_3 находится из выражения [3]

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{e \sin \varphi}{A + e \cos \varphi}, \quad (9)$$

где e – эксцентриситет, м; A – расстояние от оси вращения эксцентрика до оси вращения рычагов, м.

Приравняв правые части уравнений (8) и (9), получим формулу аналога пути валов в осевом направлении:

$$S = \frac{B e \sin \varphi}{A + e \cos \varphi}. \quad (10)$$



Для того чтобы перейти от аналогов к реальным значениям, необходимо учесть, что

$$\varphi = \omega_3 t, \quad (11)$$

где ω_3 – угловая скорость эксцентрика, рад/с; t – время, с.

Тогда выражение (10) будет иметь вид:

$$S = \frac{Be \sin(\omega_3 t)}{A + e \cos(\omega_3 t)}. \quad (12)$$

Скорость является первой производной пути по углу поворота или по времени:

$$V_o = \frac{ABe\omega_3 \cos(\omega_3 t) + Be^2\omega_3}{(A + e \cos(\omega_3 t))^2}. \quad (13)$$

Ускорение – это первая производная от скорости по времени или вторая производная пути:

$$a_o = \frac{Be\omega_3^2 \sin(\omega_3 t) (-A^3 + Ae^2 \cos^2(\omega_3 t) + 2Ae^2 + 2e^3 \cos(\omega_3 t))}{(A + e \cos(\omega_3 t))^4}. \quad (14)$$

Следующим этапом исследований является математическое моделирование кинематических и силовых параметров. Для проведения моделирования необходимо знать геометрические параметры смесителя. Исследуемый агрегат имеет следующие размеры, м: $A = 0,125$; $B = 0,220$; $e = 0,020$.

Угловая скорость эксцентрика может быть определена из выражения

$$\omega_3 = \omega_1 i_{3-1}, \quad (15)$$

где ω_1 – угловая скорость рабочих органов; $\omega_1 = 6,074$ рад/с; i – передаточное отношение, $i = 27,381 \cdot 10^{-3}$.

В ходе моделирования пути, скорости и ускорения валов в осевом направлении получена графическая зависимость этих параметров от угла поворота эксцентрика (рис. 4).

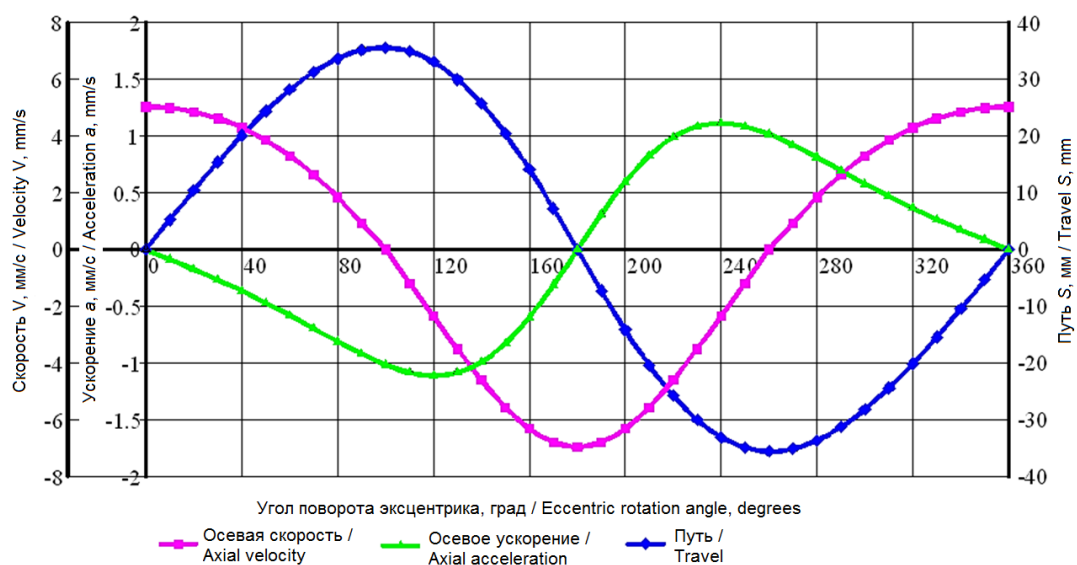


Рис. 4. Кинематические характеристики смесителя при отношении скоростей $V_o/V_m = 0,0015$

Fig. 4. Kinematic characteristics of the mixer with the ratio of velocities of $V_o/V_m = 0,0015$



Практический интерес представляют максимальные значения скорости и ускорения. Так, согласно графику, осевая скорость имеет наибольшее значение при угле поворота эксцентрика, равном 180° , а ускорение – соответственно при 120° или 240° .

Эти данные необходимы для определения зависимости максимального осевого ускорения от максимальной осевой скорости при изменении последнего от нуля до V_m . В этом случае ускорение рассчитывается по формуле (16) при угле поворота эксцентрика, рассмотренном выше, и угловой скорости ω_3 , соответствующей определенному значению осевой скорости:

$$\omega_3 = \frac{V_o(A-e)}{Be^2-ABe}. \quad (16)$$

Результаты и их обсуждение

По результатам расчетов была получена графическая зависимость осевой скорости и ускорения от отношения скоростей V_o/V_m (рис. 5). Анализ данной зависимости показал, что для снижения динамических нагрузок следует использовать смесители в том диапазоне изменения осевой скорости, в котором ускорение меняется незначительно. На рис. 5 этот диапазон находится в интервале изменения отношения скоростей от 0 до 0,2.

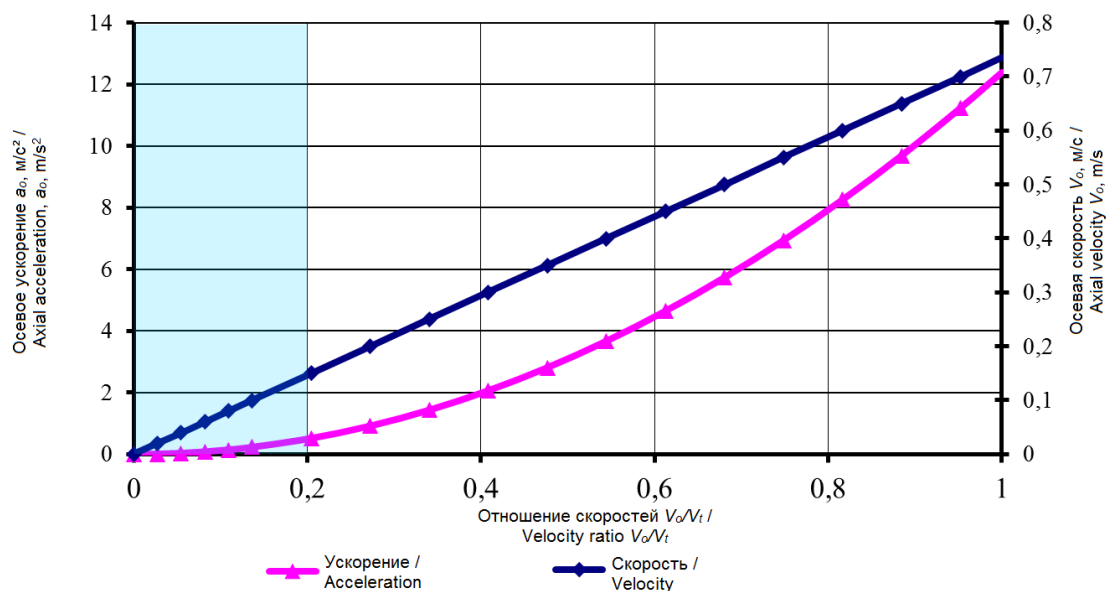


Рис. 5. Зависимость осевой скорости и ускорения от отношения скоростей V_o/V_m
Fig. 5. Dependence of axial velocity and acceleration on velocity ratio V_o/V_m

Зависимость тангенциальной нагрузки при изменении угла поворота лопатки от 0 до 90° представлена на рис. 6. Проанализировав полученную зависимость, получили оптимальный диапазон изменения угла поворота лопатки, находящийся в пределах $60-85^\circ$. Это можно объяснить тем, что при малых углах смесь продвигается медленно, а при углах, близких к 45° , возникают большие нагрузки.

Характер изменения осевой нагрузки показан на рис. 7.

В выбранном интервале с увеличением угла поворота лопатки осевая нагрузка возрастает, в то время как тангенциальная уменьшается. Это является следствием постоянства результирующей силы по величине. Однако увеличение отношения скоростей приводит к увеличению тангенциальной и уменьшению осевой нагрузки, что, несомненно, необходимо учитывать при синтезе механизма с целью увеличения его производительности.

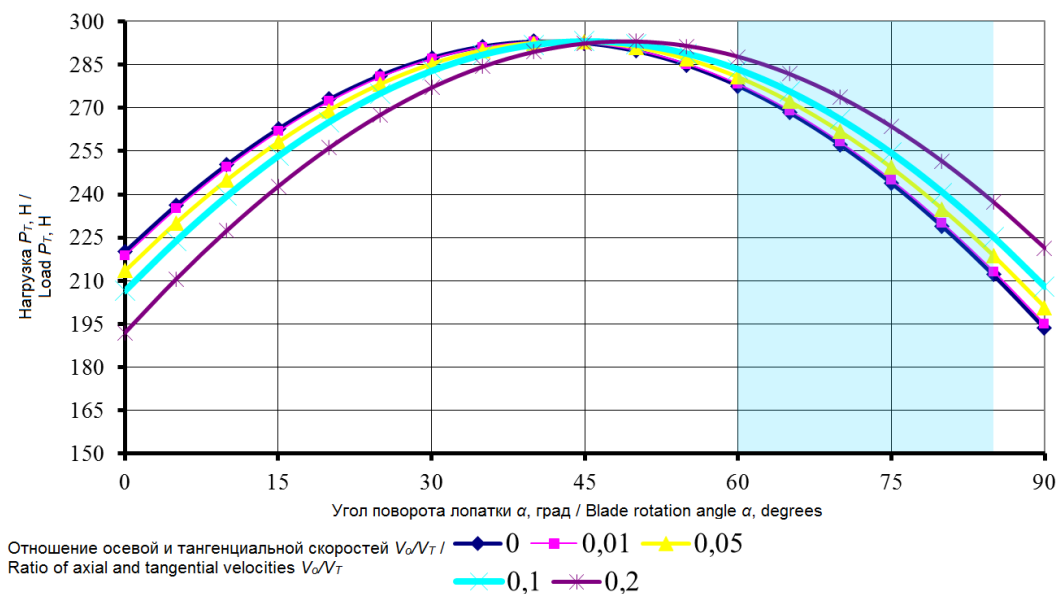


Рис. 6. Тангенциальная нагрузка при различном отношении осевой и тангенциальной скорости
Fig. 6. Tangential load at a different ratio of axial and tangential velocities

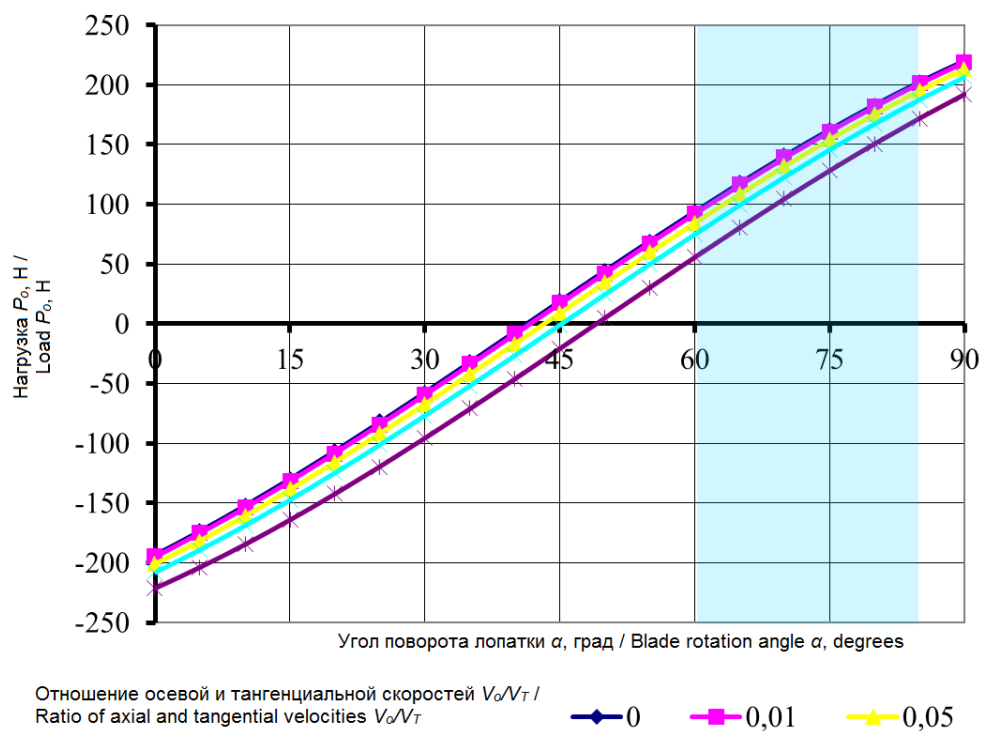


Рис. 7. Осевая нагрузка при различном отношении осевой и тангенциальной скорости
Fig. 7. Axial load at a different ratio of axial and tangential velocities

Заключение

По результатам проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Расчетная схема смесителя, разработанная для исследования возможности повышения производительности агрегата, позволила определить оптимальные значения кинематических и силовых параметров.



2. Анализ кинематических параметров смесителя показал, что осевая скорость имеет наибольшее значение при угле поворота эксцентрика 180° , а ускорение – при 120° или 240° . Для снижения динамических нагрузок на рабочие органы необходимо использовать такие скоростные режимы, при которых ускорение меняется незначительно, то есть в интервале отношения скоростей от 0 до 0,2.

3. В связи с тем что при малых углах установки лопаток на рабочих валах смесь продвигается медленно, а при углах, близких к 45° , возрастают нагрузки, оптимальный угол установки лопатки находится в диапазоне от 60° до 85° .

4. При повышении производительности смесителя с вращательным и возвратно-поступательным движением рабочих органов необходимо учитывать, что увеличение отношения скоростей приводит к увеличению тангенциальной и уменьшению осевой нагрузки, при этом количество лопаток не влияет на производительность смесителя.

Библиографический список

1. Афанасьев Ю.А., Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г. Кинематическая схема автоматической линии BRAIBANTI // Сборник научных трудов НГТУ. 2006. № 2 (44). С. 3–8.
2. Podgornij Y.I., Martynova T.G., Skeebe V.Y., Kosilov A.S., Chernysheva A.A., Skeebe P.Y. Experimental determination of useful resistance value during pasta dough kneading // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Art. 082039 (6 p.). DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082039.
3. Птицын С.В., Скиба В.Ю., Чёсов Ю.С., Мережко Е.В. Надежность прогноза качества технологического оборудования // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2013. № 2 (59). С. 33–38.
4. Чернов М.Е., Медведев Г.М., Негруб В.П. Справочник по макаронному производству. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 304 с.
5. Мартынова Т.Г., Подгорный Ю.И., Птицын С.В. Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик смесителя // Научный вестник НГТУ. 2011. № 2. С. 183–188.

References

1. Afanas'ev Yu.A., Podgorniy Yu.I., Martynova T.G. Kinematic diagram of BRAYBANTI automatic line. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 2006, no. 2 (44), pp. 3–8. (In Russian)
2. Podgornij Y.I., Martynova T.G., Skeebe V.Y., Kosilov A.S., Chernysheva A.A., Skeebe P.Y. Experimental determination of useful resistance value during pasta dough kneading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87. Art. 082039 (6 p.). DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082039.
3. Ptitsyn S.V., Skeebe V.Yu., Chesov Yu.S., Merezko E.V. Reliability prediction of quality process equipment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Materials Science]. 2013, no. 2 (59), pp. 33–38. (In Russian)
4. Chernov M.E., Medvedev G.M., Negrub V.P. *Spravochnik po makaronnomu proizvodstvu* [Reference book of pasta production]. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1984, 304 p. (In Russian)
5. Martynova T.G., Podgorniy Yu.I., Ptitsyn S.V. Experimental researches of loading characteristics of a mixer. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 2011, no. 2, pp. 183–188. (In Russian)

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 12.12.2017 г.
The article was received 12 December 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 004-046 - 62-932.2

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-47-57>

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОСИГНАЛОВ ДИЗЕЛЕЙ, ЗАПИСАННЫХ В ЦИФРОВОМ ВИДЕ

© Ю.В. Волков¹

Высшая школа технологий и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна,

Российская Федерация, 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

РЕЗЮМЕ. Совершенствование эксплуатации дизельных энергетических установок возможно при организации безразборного диагностирования по параметрам вибрации. **ЦЕЛЬ** работы заключается в разработке способа обработки цифровых вибросигналов дизеля с учетом его особенностей как объекта диагностирования. **МЕТОДЫ.** Используются методы быстрого преобразования Фурье, синфазного накопления и осреднения, частотной фильтрации и фазового стробирования, в рамках которых выделяется полезный вибросигнал и определяются диагностические параметры. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Обосновано получение диагностических параметров вибросигналов, формируемых динамическими процессами дизеля. **ВЫВОДЫ.** Разработан способ получения диагностических параметров цифровых вибросигналов дизеля, а именно, частоты и амплитуды пиковых значений спектральной плотности мощности, соответствующих динамическим процессам дизеля. Проведенная проверка по оценке рабочего процесса дизеля 2Ч8,5/11 показала погрешность способа 4%.

Ключевые слова: дизель, вибросигнал, оцифровка, быстрое преобразование Фурье, спектральная плотность мощности, частотный диапазон, синфазное накопление, точность оценки, рабочий процесс, индикаторная диаграмма.

Формат цитирования: Волков Ю.В. Особенности получения диагностических параметров вибросигналов дизелей, записанных в цифровом виде // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 47–57. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-47-57

FEATURES OF OBTAINING DIGITALLY RECORDED DIESEL VIBRATION SIGNAL DIAGNOSTIC PARAMETERS

Yu.V. Volkov

Higher school of Technology and Energy, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design,
4 Ivan Chernykh St., Saint Petersburg 198095, Russian Federation

ABSTRACT. Operation of diesel power plants can be improved through the organization of in-place diagnostics by vibration parameters. The **PURPOSE** of the work is to develop a method of digital processing of diesel vibration signals taking into account engine features as an object of analysis. **METHODS.** The methods of fast Fourier transform, common-mode accumulation and averaging, frequency filtration and phase strobing have been used to identify a useful vibration signal and determine diagnostic parameters. **RESULTS.** Substantiation is given to the obtained diagnostic parameters of vibration signals generated by diesel dynamic processes. **CONCLUSIONS.** A method has been developed to obtain diagnostic parameters of diesel digital vibration signals including frequency and amplitude of the peak values of power spectral density that correspond to the dynamic processes in the diesel engine. Conducted test of diesel 2Ch8,5/11 operation assessment has showed a 4% error of the method.

Keywords: diesel, vibration signal, digitization, fast Fourier transform, power spectral density (PSD), frequency range, common-mode accumulation, estimation accuracy, operation process, indicator diagram

For citation: Volkov Yu.V. Features of obtaining digitally recorded diesel vibration signal diagnostic parameters. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 47–57. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-47-57

¹Волков Юрий Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей, e-mail: volkovuv@mail.ru

Yury V. Volkov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Power Plants and Heat Engines, e-mail: volkovuv@mail.ru



Введение

Было бы очень хорошо, если бы техника не изнашивалась. Особенно сложная, потому что чем техника сложнее, тем дороже ее ремонт, и время простоя тоже недешево^{2,3}. Ремонт начинается с того, что технику приходится разбирать по частям. Зачастую при этом обнаруживается, что состояние узлов и деталей позволяет машине или механизму работать еще такое же время, а то и большее. Но как определить, что техника работоспособна?

Вибрация считается одним из перспективных диагностических признаков для безразборного определения состояния техники. Методы диагностирования техниче-

ских объектов по параметрам вибрации, такие как амплитудный анализ, анализ огибающей и спектральный анализ, приемлемы для простых механизмов, а для дизеля позволяют оценить только общее состояние и не позволяют добиться увеличения глубины диагностирования вплоть до определения структурных параметров⁴ [1, 2].

Решение указанной задачи в настоящее время видится в совершенствовании применения методов спектрального анализа⁵, основанного на достигнутом уровне развития цифровой виброизмерительной техники [3].

Подготовка оцифровки вибросигналов дизеля

Современный процесс диагностирования по вибросигналам основан на записи аналогового сигнала, перевода его в цифровой вид и дальнейшей обработке методами цифровой обработки сигнала (ЦОС). Запись и оцифровка аналогового вибросигнала производятся при помощи датчиков и аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Датчики и АЦП имеют свои характеристики, которые оказывают существенное влияние на полноту вибродиагностической информации. Поэтому необходимо очень тщательно производить подготовку изме-

рительного тракта для получения вибросигнала в цифровом виде⁶.

Безусловным лидером в методах ЦОС является алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Основная идея БПФ – деление дискретного временного ряда Фурье (ДВРФ) на два и более меньших ДВРФ, каждый из которых можно вычислить отдельно, а затем линейно просуммировать с остальными с тем, чтобы получить ДВРФ исходной последовательности. В свою очередь ДВРФ меньшего размера можно поделить на еще меньшие ДВРФ

²Сугак Е.В., Кучкин А.Г., Бельская Е.Н. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие; в 3 ч. Ч. 2. Надежность технических систем. Красноярск: Изд-во СибГАУ, 2013. 436 с. / Sugak E.V., Kuchkin A.G., Belskaya E.N. Reliability of technical systems and technogenic risk: Learning aids in 3 parts. Part 2. Reliability of technical systems. Krasnoyarsk: SibSAU Publ., 2013, 436 p.

³Бочкарев С.В., Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. 485 с. / Bochkarev S.V., Tsaplin A.I. Diagnostics and reliability of automated systems: Learning aids. 2nd edition, Revised and enlarged. Perm: PSTU Publ., 2008, 485 p.

⁴Азовцев Ю.А., Баркова Н.А., Гаузе А.А. Вибрационная диагностика роторных машин и оборудования целлюлозно-бумажных комбинатов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГурП, 2014. 128 с. / Azovtsev Yu.A., Barkova N.A., Gauze A.A. Vibration diagnostics of rotary machines and equipment of pulp and paper mills: Learning aids. SPb.: Publishing house of Saint-Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 2014, 128 p.

⁵Любимов И.В., Мешков С.А., Ушаков А.П., Чалый Р.В. Методы и средства диагностирования технических систем: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2012. 95 с. / Lyubimov I.V., Meshkov S.A., Ushakov A.P., Chalyi R.V. Methods and tools of technical system diagnostics: Learning aids. SPb.: Publishing house of Baltic State Technical University, 2012, 95 p.

⁶Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем: учеб. пособие; в 2 ч. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. Ч. 2, 2014. 128 с. / Gavrilin A.N., Moizes B.B. Diagnostics of technological systems: Learning aids; in 2 parts. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University. Part 2, 2014, 128 p.



соответственно меньших последовательностей.

Анализ характеристик вибросигнала удобно проводить через оценку функции спектральной плотности мощности (СПМ), получаемой посредством алгоритма БПФ – функции, описывающей распределение мощности сигнала в зависимости от частоты f , т.е. мощности, приходящейся на единичный интервал частоты.

Вычисление односторонней СПМ производят по известной из источника [4] формуле

$$D(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} M[|X(f, T)|^2], \quad (1)$$

где $X(f, T)$ – БПФ случайного стационарного процесса $x(t)$, который в свою очередь рассчитывается как

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt, \quad (2)$$

где T – длина реализации, с.

Оценку величины D получают, опуская в формуле (1) знаки предела и математического ожидания:

$$\hat{D}(f) = \frac{2}{T} |X(f, T)|^2. \quad (3)$$

При этом обеспечивается максимально высокая разрешающая способность

$$R = \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Точность оценки СПМ случайного стационарного процесса характеризуется средним квадратом ошибки, который состоит из двух частей. Первая часть – это дисперсия оценки, характеризующая долю случайности в величине ошибки. Вторая часть есть квадрат смещения оценки, характеризующий ее систематическое отклонение. Г. Дженкинсом и Д. Ваттсом [5] установлено, что ошибка смещения пренебрежимо мала и обычно ее исключают. На практике используют нормированную среднеквадратичную ошибку, которая с учетом сказанного может быть записана в виде:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{M[(\hat{D}(f) - D(f))^2]}{D^2(f)}} = \frac{\sigma(\hat{D}(f))}{D(f)}. \quad (5)$$

Согласно [6], каждая частотная составляющая оценки $\hat{D}(f)$ имеет выборочное распределение:

$$\frac{\hat{D}(f)}{D(f)} = \frac{\chi_n^2}{n}, \quad (6)$$

где χ_n^2 – величина, подчиняющаяся χ^2 -распределению с n степенями свободы.

Поскольку среднее значение и дисперсия величины, подчиняющейся χ^2 -распределению, составляют n и $2n$ соответственно, нормированная среднеквадратичная ошибка в этом случае равна

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{n}}, \quad (7)$$

где n – среднее значение $\hat{D}(f)$, подчиняющееся χ^2 -распределению, равно 2 – числу степеней свободы для первых трех членов ряда Фурье.

Как видно, эта ошибка будет равна 1, т.е. оцениваемой величине, что неприемлемо. Поэтому на практике спектральную оценку получают путем вычисления оценок по n_V различным участкам реализаций длиной T_V каждая и их последующего усреднения, что приводит к сглаженной оценке:

$$\hat{D}(f) = \frac{2}{n_V \cdot T_V} \sum_{i=1}^{n_V} |X_i(f, T_V)|^2. \quad (8)$$

В этом случае сглаженная оценка имеет ошибку

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{n_V}}, \quad (9)$$

а разрешение спектральной оценки по частоте задается приближенным равенством

$$R_V \approx \frac{1}{T_V}. \quad (10)$$

Очевидно, что минимальная длина реализации должна быть



$$T_V^{min} = n_V \cdot T_V. \quad (11)$$

Следовательно, ошибка оценки спектра будет определяться как

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{R_V \cdot T_V^{min}}}. \quad (12)$$

Из формулы (12) вытекает заключение, что если R_V – известный параметр, определяемый, например, характеристиками применяемой аппаратуры, то длина минимальной реализации может быть определена из соотношения

$$T_V^{min} = \frac{1}{R_V \cdot \varepsilon^2}. \quad (13)$$

Следовательно, задаваясь значением ошибки оценки СПМ, можно рассчитывать длину необходимой реализации и необходимое число усреднений n_V .

При получении СПМ для дискретно-временных последовательностей (которыми являются вибросигналы дизеля, записанные в цифровом виде) необходимо по конечному количеству отсчетов данных получать статистически устойчивые спектральные оценки с максимально возможным разрешением. Обработка конечных записей данных требует принятия определенных компромиссов относительно разрешения, устойчивости (минимизации дисперсии) и подавления просачивания. Для этого необходимо произвести выбор функций окна (для взвешивания данных и корреляционных функций) и параметров усреднения во временной и частотной областях, которые позволяют сбалансировать требования к снижению уровня боковых лепестков, выполнению эффективного усреднения по ансамблю и к обеспечению приемлемого спектрального разрешения.

Устойчивые результаты (малые спектральные флуктуации) и хорошая точность (малое смещение относительно ис-

тинных спектральных значений на всех частотах) достижимы только тогда, когда

$$T \cdot W \gg 1, \quad (14)$$

где T – полный интервал записи данных, с; W – эквивалентная ширина полосы, Гц.

В этом случае для всех спектральных оценок будет выполняться условие

$$Q \cdot T \cdot W_S \approx 1, \quad (15)$$

где W_S – эффективная статистическая ширина полосы окна, которая в случае спектрального окна $\Omega(f)$ определяется выражением

$$W_S = \frac{\left[\int_{-\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} \Omega(f) df \right]^2}{\int_{-\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} \Omega^2(f) df}. \quad (16)$$

Статистический показатель качества оценки Q определяется как отношение дисперсии оценки СПМ к квадрату математического ожидания этой оценки:

$$Q = \frac{\sigma^2(\hat{D}(f))}{[M(\hat{D}(f))]^2}. \quad (17)$$

Таким образом, для достижения наибольшей разрешающей способности по частоте, учитывая циклический характер работы, длина исследуемой реализации должна соответствовать рабочему циклу дизеля. Для обеспечения условия устойчивости спектральных оценок скорость вращения машины должна быть постоянной. При этом разрешающая способность по частоте будет тем больше, чем меньше скорость вращения дизеля.

Учитывая вышесказанное, можно предложить способ обработки вибросигналов дизелей, описанный ниже.

Способ обработки вибросигналов дизелей

Поскольку дизель является циклической машиной, в которой процессы зарождения вибросигналов согласуются с ки-

нематическими фазами, то очевидно, что для получения достоверного диагноза необходимо получить распределение СПМ



по этим кинематическим фазам.

Решить эту задачу возможно, получив распределение СПМ во временной области. Получение такой характеристики основано на вычислении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в скользящем спектральном окне. Исходная реализация – виброакустический сигнал полного кинематического цикла – разбивается на перекрывающиеся блоки, на каждый из которых

накладывается спектральное окно. Выполняется БПФ блоков. Каждое из этих преобразований соответствует своему отрезку времени. Таким образом, получаем СПМ в зависимости от времени прохождения вибросигнала – эволюционирующую СПМ или спектрограмму, в осях частоты и угла поворота коленчатого вала (п.к.в.), представленную на рис. 1.

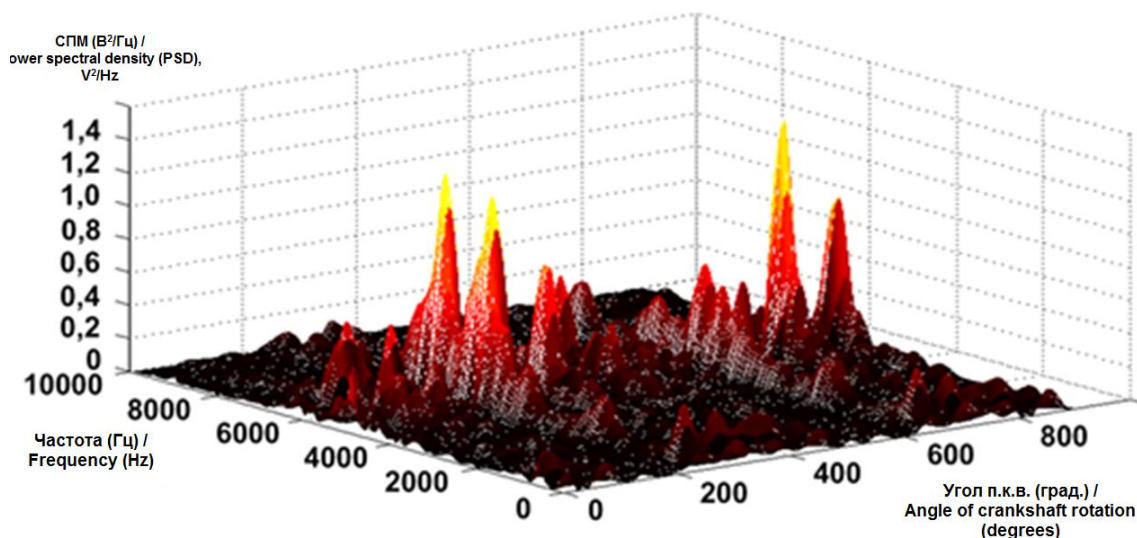


Рис. 1. Эволюционирующая СПМ (спектрограмма) вибросигнала двухцилиндрового дизеля
Fig. 1. Evolutionary PSD (power spectral density) of a 2-cylinder diesel vibration signal

Однако разбиение реализации на блоки ведет к уменьшению временного интервала и, соответственно, к уменьшению спектрального окна, что негативно сказывается на частотном разрешении. Это проиллюстрировано на рис. 2, где для удобства спектрограмма из рис. 1 представлена в линиях уровня.

Как видно из рис. 2, увеличение спектрального окна ведет к «размыванию» СПМ по фазе кинематического цикла, а его уменьшение ведет к «размыванию» СПМ по частоте.

Также негативное влияние могут оказывать случайные помехи, возможные в условиях эксплуатации.

С учетом изложенного можно предложить следующий способ обработки сигнала.

Прежде всего необходимо определить наличие сигнала в кинематической

фазе, соответствующей определенному динамическому процессу. Для этого реализации обрабатываются скользящим спектральным окном, ширина которого позволит позиционировать пиковые СПМ по кинематической фазе (углу п.к.в.) с наименьшей погрешностью оценки фазового угла. Результат этой обработки представлен на рис. 3.

Погрешность оценки фазового угла рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{W \cdot (1 - k_W) \cdot \varphi_{min}}{T_V^{min} \cdot f_D} \quad (\text{град}), \quad (18)$$

где W – ширина спектрального окна; k_W – коэффициент перекрытия спектрального окна; φ_{min} – угол кинематической фазы, соответствующий спектральному окну, град.; T_V^{min} – длина реализации, с; f_D – частота дискретизации, Гц.

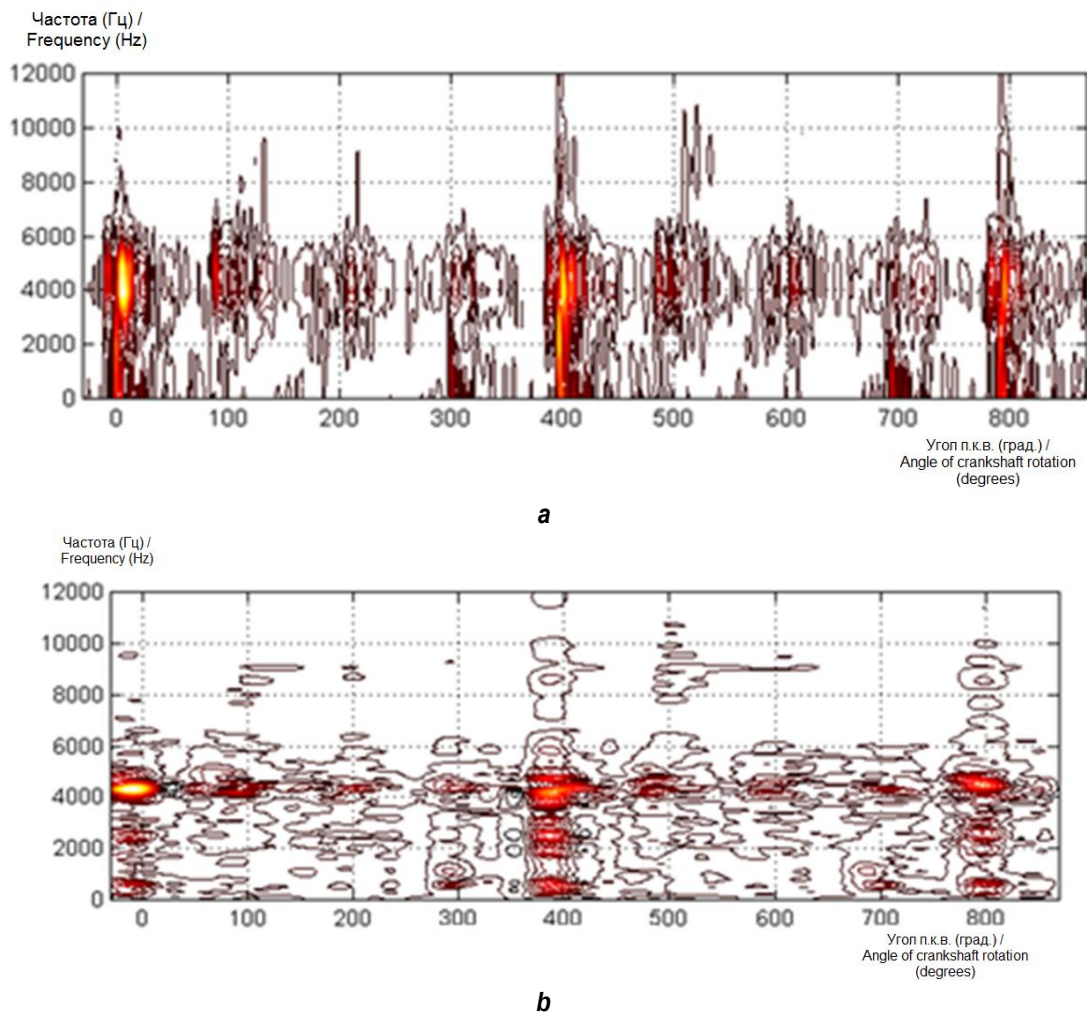


Рис. 2. Спектрограммы одного вибросигнала, полученные:
a – 100-точечным спектральным окном Хэннинга;
b – 1000-точечным спектральным окном Хэннинга
Fig. 2. Spectrograms of a single vibration signal received:
a – by 100-point Hanning spectral window;
b – by 1000-point Hanning spectral window

Разрешение по частоте при этом составит

$$\varepsilon_f = \frac{f_D}{W} \quad (\text{Гц}). \quad (19)$$

Далее производится операция синфазного накопления и осреднения спектрограмм для снижения вероятности попадания случайного сигнала по каждому фазовому строку, соответствующему динамическому процессу.

Определяются частоты наибольших пиковых СПМ. Производится фильтрация реализации в частотных полосах, ширина которых определится разрешающей способностью выбранного спектрального окна

ε_f с центральными частотами, соответствующими частотам наибольших пиковых СПМ (рис. 4).

Отфильтрованные реализации обрабатываются спектральным окном шириной, равной длине реализации.

Производится операция синфазного накопления и осреднения.

Определяются частоты и значения наибольших пиковых СПМ (рис. 5).

После обработки вибросигнала таким способом будут получены диагностические параметры, а именно: величина и частота пиковой СПМ динамического процесса.

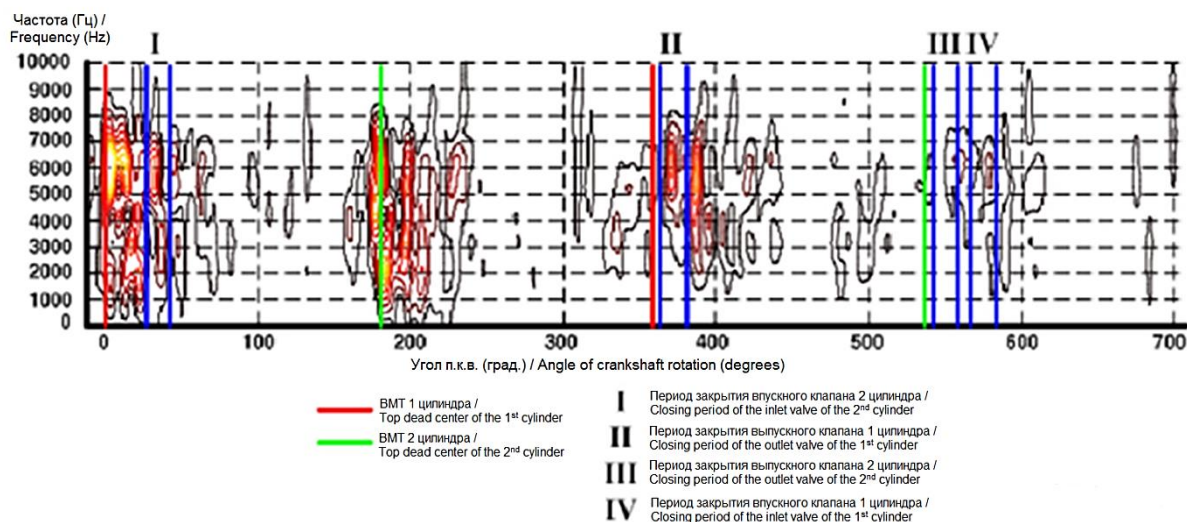


Рис. 3. Спектрограмма вибросигнала, совмещенная с кинематическим циклом двухцилиндрового дизеля

Fig. 3. Vibration signal spectrogram combined with a kinematic cycle of a 2-cylinder diesel

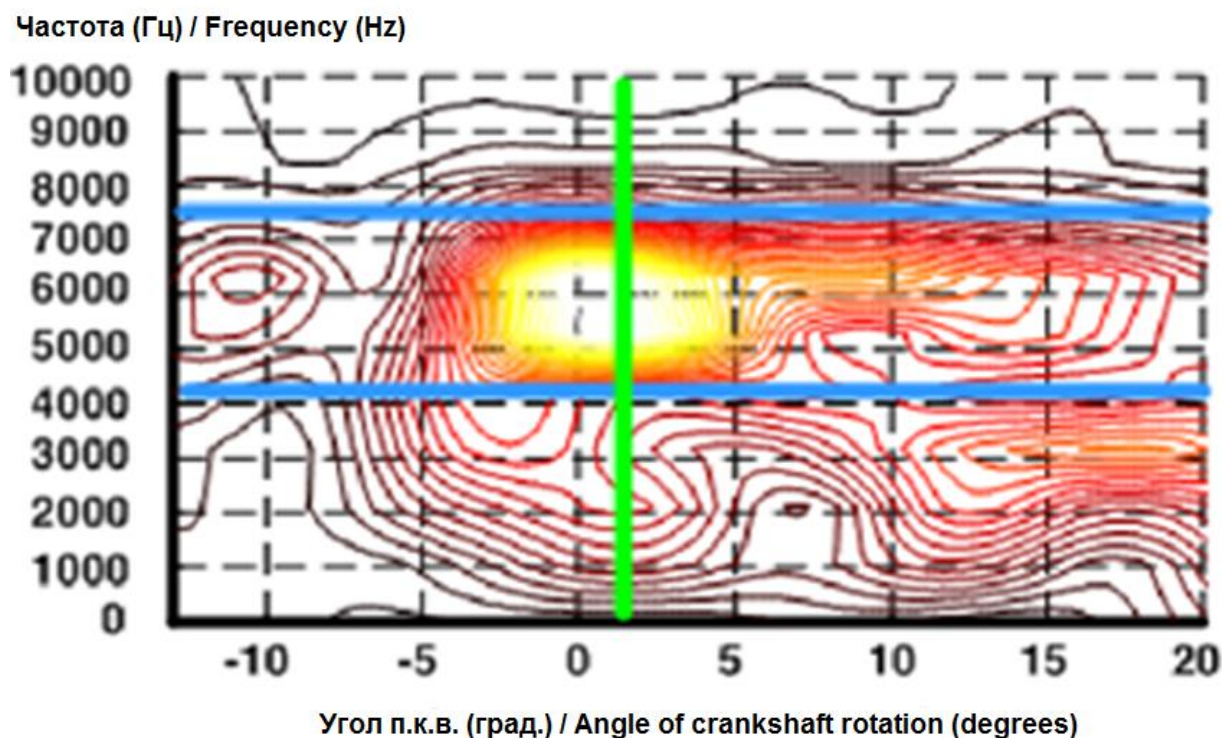


Рис. 4. Определение фазы (вертикальная линия) и частотного диапазона (горизонтальные линии) рабочего процесса дизеля

Fig. 4. Determination of phase (vertical line) and frequency range (horizontal line) of diesel operation

Для исключения наложения сигналов динамических процессов различных цилиндров дизеля предлагается исходные реализации по каждому цилиндру пред-

ставлять с момента подачи топлива в этот цилиндр до момента подачи топлива в следующий по кинематическому циклу цилиндр дизеля.



СПМ ($\text{В}^2/\text{Гц}$) / Power spectral density (PSD), V^2/Hz

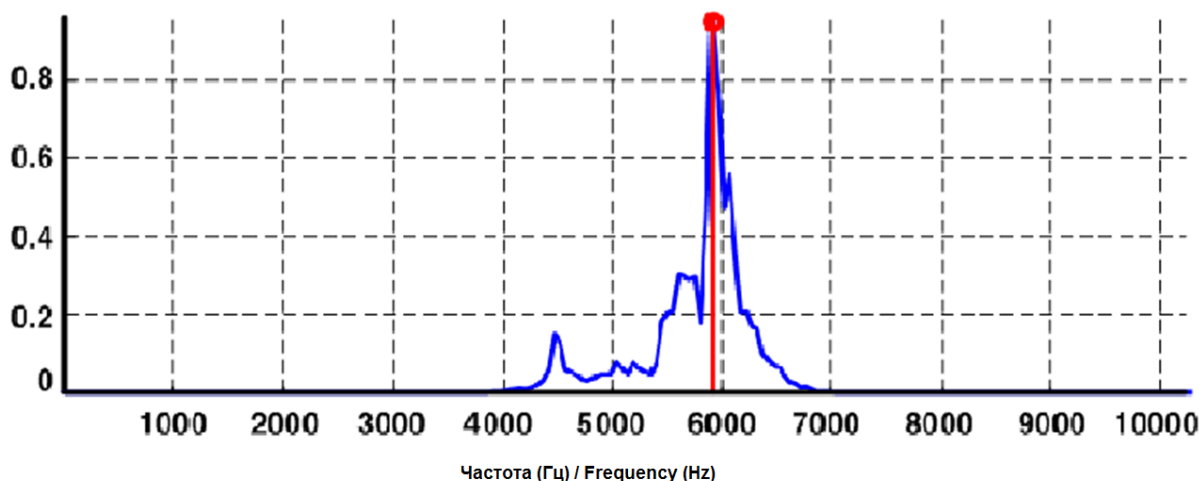


Рис. 5. Определение частоты и величины пиковой СПМ
Fig. 5. Determination of peak PSD frequency and magnitude

Оценка характеристик вибросигнала рабочего процесса дизеля

В качестве практической реализации предложенного способа была произведена оценка характеристик вибросигнала, порождаемого рабочим процессом дизеля 2Ч 8,5/11.

Известно, что вибросигнал от взрыва топливовоздушной смеси в камере сгорания самый мощный в перечне динамических процессов [7]. Вибросигнал, генерируемый рабочим процессом, обладает двумя важными качествами. Во-первых, его оценка не позволяет определить структурные параметры машины. Следовательно, его необходимо отфильтровывать, а значит, необходимо знать его частотный диапазон. Во-вторых, при отсутствии средств измерения давления в цилиндрах дизеля оценка его параметров позволит определять распределение нагрузки по цилиндрам двигателя, поскольку давление ударной волны эквивалентно мощности вибросигнала [8].

Теоретическая оценка спектра частот колебаний рабочего процесса была

произведена на основе представления о протекании процессов горения топлива в камере сгорания дизелей, разработанном академиком Н.Н. Семеновым и его школой⁷. В соответствии с этой теорией тепловой взрыв топливовоздушной смеси, поданной в камеру сгорания, происходит во второй фазе процесса сгорания, называемой начальным горением (рис. 6).

Процесс резкого повышения давления и является источником колебаний элементов двигателя, поскольку сопровождается появлением ударных волн. Как и любые другие, ударные волны имеют свой частотный диапазон и амплитуды. Поведение ударных волн в цилиндре дизеля носит сложный характер, не поддающийся точному описанию [9]. Поэтому при рассмотрении процесса повышения давления в цилиндре дизеля с точки зрения возбуждения колебательного процесса принято допущение о возникновении одной ударной волны.

⁷Сигар А.В. Теория корабельных двигателей внутреннего сгорания: учебник для высших военно-морских училищ. Л.: Изд-во Военно-морской академии, 1978. 240 с. / Sigar A.V. Theory of ship internal combustion engines: textbook for higher naval schools. L.: Naval Academy Publ., 1978. 240p.

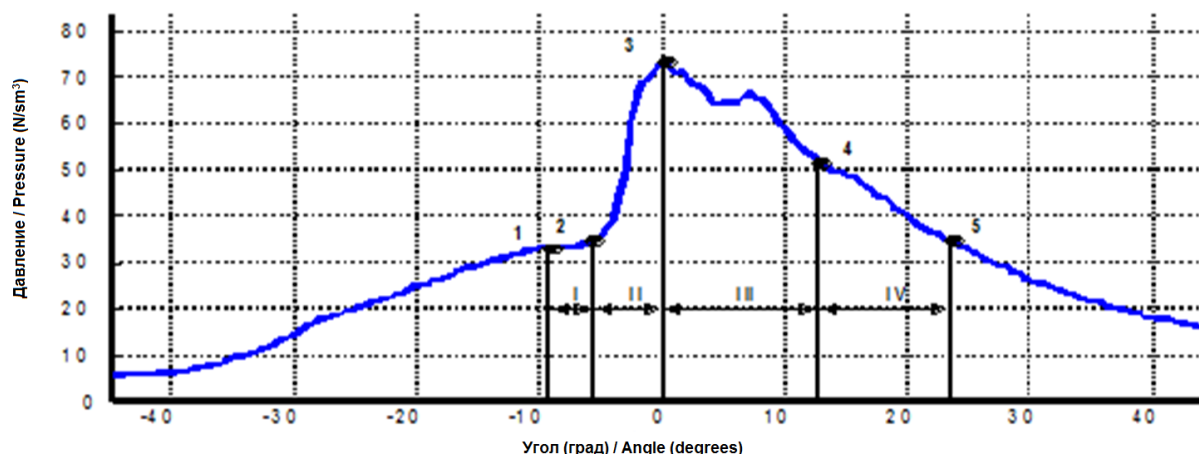


Рис. 6. Индикаторная диаграмма и основные фазы процесса сгорания в дизеле:
I-я фаза – период задержки воспламенения; II-я фаза – начальное горение;
III-я фаза – основное горение; IV-я фаза – догорание

Fig. 6. Indicator diagram and main phases of the combustion process in a diesel engine:
phase I – period of ignition delay; phase II – initial combustion;
phase III – main combustion; phase IV – final combustion

Из теории колебаний известно, что энергия, переносимая волной, пропорциональна ее амплитуде [8]. Следовательно, наибольшее количество энергии ударная волна передает стенкам камеры сгорания в момент своего наибольшего значения, т.е. в момент максимального давления (давление сгорания). Поэтому период начального горения можно рассматривать как четверть периода волны. Следовательно, весь период

$$T_{\Gamma} = 4 \cdot t_{\Gamma}, \quad (20)$$

где t_{Γ} – длительность периода начального горения.

Частота колебаний, вызываемых ударной волной, будет определяться как

$$f_{\Gamma} = \frac{1}{T_{\Gamma}}. \quad (21)$$

Таким образом, вторая фаза сгорания, которая по индикаторной диаграмме длится от начала заметного повышения давления (начало видимого горения) до достижения максимального давления цикла, представляющая собой период развития очагов воспламенения и распространения горения на весь объем смеси, является

также и источником колебаний двигателя с частотой f_{Γ} .

Проведенные сеансы записи давлений в цилиндре при работе дизеля на полной нагрузке позволили обработать индикаторные диаграммы и получить среднюю продолжительность линии горения, равную 6 град. п.к.в.

Расчеты колебаний, возбуждаемых рабочим процессом дизеля, проведенные по формуле (21), позволили вычислить значение $f_{\Gamma} = 375$ Гц для полученного периода начала горения.

Для определения информативных частотных диапазонов колебаний рабочего процесса были проведены два однофакторных эксперимента. Первый заключался в снятии виброускорений при работе двигателя с изменением нагрузки. Второй – при прокрутке дизеля от электродвигателя в различных режимах при изменении частоты вращения.

Запись виброускорений производилась по десять реализаций для одного сеанса.

Коэффициенты корреляции в каждой группе СПМ составили более 0,98.

Обработка полученных данных производилась сравнением эволюционирующих СПМ, представленных в линиях уров-



ня, и пиковых величин СПМ на всех частотах вращения двигателя для каждого режима работы и прокрутки двигателя, с наложением диаграммы фаз газораспределения, предварительно преобразованной в линейный вид (см. рис. 3).

Проведенный анализ позволил определить частоту колебаний, возбуждаемых рабочим процессом дизеля 248,5/11,

среднее значение которой составило 390,6 Гц. По сравнению с предварительно рассчитанной теоретической частотой колебаний в 375 Гц эта величина имеет погрешность 4%.

Проведенная оценка максимальных значений виброускорений и максимальных значений давления сгорания позволила получить коэффициент корреляции 0,96.

Заключение

Диагностирование дизеля по вибросигналам может быть осуществлено по результатам обработки функции СПМ динамических процессов, анализируя вибросигнал на определенных временных интервалах, связанных с углом поворота коленчатого вала. Эта операция осуществляется с помощью фазовой и частотной селекции сигнала, синфазного накопления и осреднения. Диагностическими параметрами при этом являются частота и величина пиковой СПМ в частотном диапазоне соответствующего динамического процесса.

Проведенные экспериментальные

исследования по оценке вибросигналов, порождаемых рабочим процессом дизеля, позволили подтвердить практическую возможность применения разработанного способа.

Для оценки частоты вибрации от рабочего процесса предложен численный способ ее оценки.

Оценка параметров рабочего процесса по вибросигналам показала приемлемую точность, что позволяет проводить подобные мероприятия без дополнительного оснащения датчиками и измерительными приборами.

Библиографический список

1. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. М.: Наука, 1979. 295 с.
2. Попков В.И., Мышинский Э.Л., Попков О.И. Виброакустическая диагностика в судостроении; 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
3. Серов А.А., Долаберидзе Г.В., Иванова М.А., Соловова А.Г., Власишен Ю.В. Программное обеспечение виброакустического мониторинга машинного оборудования на основе метода s-дискриминантов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 2. С. 91–97.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных; пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.

5. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения; в 2 вып.; пер. с англ. М.: Мир. Вып. 1 – 1971, 317 с.; вып. 2 – 1972.
6. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения; пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
7. Тузов Л.В. Основные источники повышенной вибрации и шума дизелей // Транспортное машиностроение. 1960. № 5. С. 27–36.
8. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. М.: Машиностроение, 1971. 224 с.
9. Филимонов В.Ю., Кошелев К.Б. Тепловой взрыв в закрытых системах. Критерии и критические условия // Физика горения и взрыва. 2017. № 5. С. 53–63.

References

1. Artobolevskii I.I., Bobrovnikskii Yu.I., Genkin M.D. *Vvedenie v akusticheskuyu dinamiku mashin* [Introduction to the acoustic dynamics of machines]. Moscow: Nauka Publ., 1979, 295 p. (In Russian)
2. Popkov V.I., Myshinskii E.L., Popkov O.I. *Vibroakusticheskaya diagnostika v sudostroenii* [Vibroacoustic diagnostics in shipbuilding]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1989, 256 p. (In Russian)
3. Serov A.A., Dolaberidze G.V., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Vlasishen Yu.V. *Software for vibroacoustic monitoring of machinery on the basis of an S-discriminant method. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2012, no. 2, pp. 172–177. (In Russian)
4. Bendat Dzh., Pirsol A. *Prikladnoi analiz sluchainykh dannykh* [Applied analysis of random data]. Moscow: Mir Publ., 1989, 540 p.
5. Dzhenkins G., Vatts D. *Spektral'nyi analiz i ego*

5. Dzhenkins G., Vatts D. *Spektral'nyi analiz i ego*



prilozheniya [Spectral analysis and its applications]. Moscow: Mir Pibl., 1971–1972.

6. Marpl-m. S. L. *Tsifrovoy spektral'nyi analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow: Mir Pibl., 1990, 584 p.

7. Tuzov L.V. *Main sources of diesel engine increased vibration and noise* // *Transportnoe mashinostroenie* [Transport engineering]. 1960, no. 5, pp. 27–36. (In

Russian)

8. Pavlov B.V. *Akusticheskaya diagnostika mekhanizmov* [Acoustic diagnostics of mechanisms]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1971, 224 p. (In Russian)

9. Filimonov V.Yu., Koshelev K.B. Thermal Explosion in Closed Systems: Criteria and Critical Conditions. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion and Shock Waves]. 2017, no. 5, pp. 53–63. (In Russian)

Критерии авторства

Волков Ю.В. провел исследование, оформил научные результаты для публикации и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Volkov Yu.V. has conducted the research, formalized the scientific results, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 16.11.2017 г.

The article was received 16 November 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.862.6

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-58-68>

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО И РЕГРЕССИОННОГО ПОДХОДОВ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ О ДВИЖЕНИИ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА

© Г.Д. Гефан¹, М.П. Базилевский²

Иркутский государственный университет путей сообщения,

Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Дисперсионный и регрессионный анализ – это одни из важнейших методов математической и прикладной статистики. Целью является демонстрация обоих подходов, их определенной общности и существенного различия. **МЕТОДЫ.** Для достижения цели использованы математические и статистические методы. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Демонстрация дисперсионного и регрессионного анализа осуществляется на примере решения задачи моделирования средней скорости движения транспорта по Глазковскому мосту в городе Иркутске в зависимости от времени суток. Для этого проведен однофакторный дисперсионный анализ и соответствующий ему регрессионный анализ с фиктивными переменными. С помощью введения еще одного фактора – будний/выходной день – проведен двухфакторный дисперсионный анализ и построена соответствующая регрессионная модель. С использованием фактора «общий уровень загруженности дорог города Иркутска» построена регрессионная модель, описывающая влияние как качественных, так и количественных факторов на среднюю скорость движения транспорта по Глазковскому мосту. **ВЫВОДЫ.** На конкретном примере проиллюстрирована определенная общность и различие дисперсионного и регрессионного подходов к анализу данных. Результаты, получаемые на основе дисперсионного анализа, могут быть воспроизведены и в рамках анализа модели регрессии, в которой влияние качественных факторов описывается с помощью фиктивных объясняющих переменных.

Ключевые слова: регрессионный анализ, дисперсионный анализ, коэффициент детерминации, уровень загруженности дорог.

Формат цитирования: Гефан Г.Д., Базилевский М.П. Сопоставление дисперсионного и регрессионного подходов на примере анализа данных о движении городского транспорта // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 58–68. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-58-68

COMPARISON OF VARIANCE AND REGRESSION APPROACHES ON EXAMPLE OF URBAN TRAFFIC DATA ANALYSIS

G.D. Gefan, M.P. Bazilevsky

Irkutsk State Transport University,

15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. Analysis of variance and regression analysis are ones of the most important methods of mathematical and applied statistics. The purpose of the article is to present both approaches specifying their similarities and significant differences. **METHODS.** Mathematical and statistical methods have been used to achieve the set purpose. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The analysis of variance and regression analysis are demonstrated on the example of solving the problem of time of day-dependent simulation of average traffic speed over the Glazkov Bridge in the city of Irkutsk. For this purpose a single factor analysis of variance and a corresponding regression analysis with dummy variables have been carried out. Introduction of a new qualitative explanatory variable – weekday/day off allowed to conduct a two-factor analysis of variance and built a corresponding regression model. The use of the factor “general level of traffic congestions on Irkutsk roads” allowed to construct a regression model describing the effect of both qualitative and quantitative factors on the average travelling speed of traffic over the Glazkov Bridge. **CONCLUSIONS.** The similarity and difference of the variance and regression approaches to the analysis of data have been shown on the specific example. The results obtained through the analysis of variance can be reproduced in the analysis of the regression model where the influence of qualitative factors is described using dummy explanatory variables.

¹Гефан Григорий Давыдович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, e-mail: grigef@rambler.ru

Grigory D. Gefan, Candidate of Physical and Mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, e-mail: grigef@rambler.ru

²Базилевский Михаил Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры математики, e-mail: mik2178@yandex.ru

Mikhail P. Bazilevsky, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, e-mail: mik2178@yandex.ru



Keywords: regression analysis, variance analysis, level of traffic jams, coefficient of determination

For citation: Gefan G.D., Bazilevsky M.P. Comparison of variance and regression approaches on example of urban traffic data analysis. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 58–68. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-58-68

Введение

Дисперсионный и регрессионный анализ – одни из важнейших методов математической и прикладной статистики^{3,4} [1–3]. Различаясь по своей исходной постановке, эти два метода, тем не менее, сближаются в некоторых случаях настолько, что оперируют идентичными показателями. Специалисты в различных областях техники, социально-экономических и естественных наук, нуждающиеся в статистическом

анализе данных, далеко не всегда уверены в выборе подходящих методов статистики. Авторы данной статьи ставили задачу: на конкретном примере проследить применение дисперсионного и регрессионного подходов к анализу данных. Целью статьи является демонстрация обоих подходов, их определенной общности и существенного различия.

Идея дисперсионного анализа и исходные данные для составления моделей

Пусть поставлена задача исследования влияния некоторого фактора A на среднее значение измеряемой величины x . В отличие от некоторых других подходов (сравнение средних значений с помощью Z - и t -критериев, использование рангового критерия Уилкоксона), дисперсионный анализ позволяет сравнивать средние значения трех и более групп. Иначе говоря, фактор может иметь произвольное число градаций (уровней). При большом числе уровней фактора попарное сравнение средних представляется довольно громоздким и трудоемким. Идея английского биолога и статистика Фишера заключалась в том, чтобы проверять гипотезу о влиянии некоторого фактора (или нескольких факторов), анализируя характеристики вариации (различные виды дисперсии). Такой подход и получил название дисперсионного анализа.

Демонстрация дисперсионного и регрессионного анализа осуществлена на примере моделирования загруженности Глазковского моста в городе Иркутске в зависимости от времени суток. Сбор стати-

стических данных осуществлялся с использованием сервиса Яндекс. Пробки [4], который позволяет в режиме реального времени видеть информацию о средней скорости движения транспорта на любом конкретном участке и оценивает общий уровень городских пробок по 10-балльной шкале. В качестве основного моделируемого показателя выступает средняя скорость движения транспорта. Фактор A – время суток – представлен шестью градациями (временными периодами): A_1 – с 7.00 до 10.00 ч; A_2 – с 10.00 до 12.00 ч; A_3 – с 12.00 до 14.00 ч; A_4 – с 14.00 до 17.00 ч; A_5 – с 17.00 до 20.00 ч; A_6 – с 20.00 до 7.00 ч.

В табл. 1 приведены данные о средней скорости движения транспорта по Глазковскому мосту в направлении Правобережного округа города Иркутска в зависимости от времени суток. Сбор данных осуществлялся в течение 11 суток – с 7.00 ч. 28 марта до 7.00 ч. 8 апреля 2017 г. (кроме понедельника 3 апреля), всего 66 наблюдений.

³ Айвазян С.А. Методы эконометрики: учебник. М.: Магистр: ИНФРА-М, 2010. 512 с. / Ayvazyan S.A. Methods of econometrics: textbook. M.: Magistr: INFRA-M, 2010, 512 p.

⁴ Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика. Начальный курс: учебник; 6-е изд., перераб. и доп. М.: Дело, 2004. 576 с. / Magnus Ya.R., Katyshev P.K., Peresetsky A.A. Econometrics. Basic course: textbook; 6th edition, revised and enlarged. Moscow: Delo, 2004, 576 p.



Таблица 1

Статистические данные о средней скорости движения, км/ч,
в зависимости от времени суток

Table 1

Statistical data on the average speed of movement, km/h depending on the time of day

Дата наблюдения, день недели / Observation data, day of week	Время суток (фактор A) / Time of day (factor A)					
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
28 марта, вторник / 28 March, Tuesday	25	30	35	40	40	40
29 марта, среда / 29 March, Wednesday	25	35	45	40	40	40
30 марта, четверг / 30 March, Thursday	25	35	40	40	45	45
31 марта, пятница / 31 March, Friday	30	40	35	35	40	45
01 апреля, суббота / 1 April, Saturday	40	35	45	45	45	45
02 апреля, воскресенье / 2 April, Sunday	40	35	45	45	45	45
04 апреля, вторник / 4 April, Tuesday	30	20	35	35	40	45
05 апреля, среда / 5 April, Wednesday	25	30	45	45	45	45
06 апреля, четверг / 6 April, Thursday	30	30	40	35	45	45
07 апреля, пятница / 7 April, Friday	30	40	35	40	40	45
08 апреля, суббота / 8 April, Saturday	45	40	40	45	45	45

На первом этапе работы с этими данными решались задачи однофакторного

дисперсионного и регрессионного анализа.

Однофакторный дисперсионный анализ

В однофакторном дисперсионном анализе фигурируют следующие величины:

а) групповые средние:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} x_{ki}, \quad k = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где k – номер уровня фактора; n_k – число измерений для уровня k ; x_{ki} – результат измерения;

б) общая средняя:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} x_{ki} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m n_k \bar{x}_k,$$

где $n = \sum_{k=1}^m n_k$ – общее число измерений;

в) полная вариация и полная дисперсия:



$$SST = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ki} - \bar{x})^2, \quad (2)$$

$$\sigma^2(x) = \frac{1}{n} SST;$$

г) межгрупповая (иначе говоря, факторная) вариация и межгрупповая (факторная) дисперсия:

$$SSA = \sum_{k=1}^m (\bar{x}_k - \bar{x})^2 n_k, \quad (3)$$

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{n} SSA;$$

д) остаточная вариация и остаточная дисперсия:

$$SSR = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ki} - \bar{x}_k)^2, \quad (4)$$

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{n} SSR.$$

Важнейшее в дисперсионном анализе утверждение состоит в том, что

$$\sigma^2(x) = \sigma_A^2 + \sigma_R^2 \text{ или } SST = SSA + SSR.$$

Итак, полная вариация (и полная дисперсия) количественного признака может быть разложена на два слагаемых. Первое из них соответствует той части, которая вызвана влиянием выбранного фактора. Другое слагаемое есть характеристика вариации, обусловленной всеми остальными факторами, которые не уточняются и полагаются случайными. Величина

$$0 \leq \eta^2 \equiv \frac{SSA}{SST} \leq 1 \quad (5)$$

называется *коэффициентом детерминации* и показывает, какую долю вариации обеспечивает исследуемый фактор.

Не надо упускать из виду, что одним из исходных положений дисперсионного

анализа является равенство дисперсий в сравниваемых генеральных совокупностях, относящихся к разным уровням фактора. Строго говоря, для сравнения трех и более дисперсий применяется так называемый критерий Кохрена. Упрощенный подход может состоять в сравнении максимальной и минимальной дисперсий по критерию Фишера.

Правила проверки статистической гипотезы о значимости (вернее, незначимости) фактора строятся на соотношении факторной и остаточной дисперсий. При этом должен быть решен вопрос о числе степеней свободы вариации. Полная вариация имеет $n-1$ степень свободы, а средний квадрат отклонения в расчете на одну степень свободы равен

$$MST = \frac{SST}{n-1} = s^2(x) = \frac{n}{n-1} \sigma^2(x).$$

Факторная вариация имеет $m-1$ степень свободы, и, соответственно,

$$MSA = \frac{SSA}{m-1} = s_A^2 = \frac{n}{m-1} \sigma_A^2.$$

Наконец, остаточная вариация имеет $n-m$ степеней свободы, и, соответственно,

$$MSR = \frac{SSR}{n-m} = s_R^2 = \frac{n}{n-m} \sigma_R^2.$$

Следует иметь в виду, что число степеней свободы вариации, как и сама вариация, подчиняется правилу разложения на так называемые факторную и остаточную части:

$$n-1 = m-1 + (n-m).$$

Для проверки гипотезы о незначительности влияния некоторого фактора A в качестве статистического критерия рассматривается отношение факторной и остаточной вариаций, вычисленных с уче-



том числа степеней свободы:

$$F = \frac{MSA}{MSR}.$$

Наблюдаемое значение дисперсионного отношения сравнивается с границей правосторонней критической области $F_{cr}(\alpha, m-1, n-m)$. При $F < F_{cr}$ нет оснований отклонить нулевую гипотезу, а это означает, что влияние фактора А следует признать незначительным.

Напомним, что в нашем случае фактором А является время суток. Этот фактор имеет шесть временных периодов (см. табл. 1). Проведем дисперсионный анализ данных (рисунок) с помощью надстройки табличного процессора Excel «Анализ данных» (режим «Однофакторный дисперсионный анализ»).

В верхней части таблицы, приведенной на рисунке, в столбце В видим, что все $n_k = 11$ ($k = \overline{1, m}$, $m = 6$), полное количество наблюдений $n = 66$; в столбцах D и E указаны групповые средние $\bar{x}_k$ и групповые дисперсии (видно, что соотношение наибольшей и наименьшей групповых дисперсий превышает 12, тогда как критическая точка

$$F_{cr}(0.05, n_k - 1, n_k - 1) = 4.85.$$

Как отмечалось выше, это противоречит исходному положению дисперсионного анализа о равенстве групповых дисперсий. Однако здесь мы не будем принимать данный факт во внимание, поскольку целью работы является демонстрация самого подхода. В реальном анализе данных сильное различие групповых дисперсий нельзя игнорировать).

	A	B	C	D	E	F
1	Однофакторный дисперсионный анализ / Single-factor analysis of variance					
2						
3	Итоги / Results					
4	Группы / Groups	Счет / Calculating	Сумма / Sum	Среднее / Average	Дисперсия / Variance	
5	Столбец 1 / Column 1	11	345	31,3636364	50,45454545	
6	Столбец 2 / Column 2	11	370	33,6363636	35,45454545	
7	Столбец 3 / Column 3	11	440	40	20	
8	Столбец 4 / Column 4	11	445	40,4545455	17,27272727	
9	Столбец 5 / Column 5	11	470	42,7272727	6,818181818	
10	Столбец 6 / Column 6	11	485	44,0909091	4,090909091	
11						
12						
13	Дисперсионный анализ / Analysis of variance					
14	Источник вариации / Source of variance	SS	df	MS	F	F крит.
15	Между группами / between groups	1424,621212	5	284,924242	12,74915254	2,3682702
16	Внутри групп / within groups	1340,909091	60	22,3484848		
17						
18	Итого / Total	2765,530303	65			

Однофакторный дисперсионный анализ
Single-factor analysis of variance



Из нижней части таблицы следует, что межгрупповая (факторная) вариация $SSA = 1424.621$ составляет от полной вариации $SST = 2765.53$ долю $\eta^2 = 0.515$. Число степеней свободы составляет: для полной вариации – $n - 1 = 65$, для межгрупповой вариации – $n - m = 60$, отношение факторной и оста-

точной вариаций, вычисленных с учетом числа степеней свободы, дает величину $F = MSA / MSR = 12.75$, что значительно превышает критическое значение. Следовательно, влияние времени суток на среднюю скорость движения транспорта по исследуемому участку (Глазковскому мосту) является значимым.

Регрессионная модель с фиктивными переменными, отвечающими за учет качественного фактора

Учет качественного фактора в модели регрессии возможен с помощью так называемых фиктивных переменных⁵ [5, 6]. Если фактор имеет m уровней, то требуется $m - 1$ фиктивная переменная. Например, в нашем случае время суток имеет шесть градаций ($m = 6$), и следует ввести переменные

$$t_j = \begin{cases} 1, & A = A_j, \\ 0, & A \neq A_j, \end{cases} \quad j = \overline{1, m-1} \quad (6)$$

Оценка модели регрессии будет иметь вид:

$$\bar{x}_k = \sum_{j=1}^{m-1} a_j^* t_j + d^*, \quad k = 1, 2, \dots, m,$$

по существу представляя собой набор тождеств, поскольку левые части этих уравнений совпадут с групповыми средними (1). Действительно, используя данные табл. 1 и обратившись к надстройке «Анализ дан-

ных» (режим «Регрессия»), получим:

$$\begin{aligned} \bar{x}_k = & -12.727t_1 - 10.455t_2 - \\ & - 4.091t_3 - 3.636t_4 - 1.364t_5 + \\ & + 44.091. \end{aligned}$$

Легко убедиться, что предсказания по этой модели для всех временных интервалов совпадают с соответствующими групповыми средними, представленными в табл. 2. Разумеется, этот тривиальный результат мы приводим лишь как исходный пункт сопоставления двух подходов.

После получения выборочного уравнения регрессии всегда рассчитываются полная вариация, остаточная вариация и вариация, объясняемая регрессией. Существует полное смысловое и количественное соответствие между этими величинами и определенными выше SST , SSR и SSA (выражения (2)–(4)), а коэффициент детерминации (5) становится показателем качества регрессии.

Двухфакторный дисперсионный анализ

Вернемся к исходным данным (см. табл. 1). Помимо времени суток важным фактором, влияющим на интенсивность движения и, следовательно, на среднюю скорость транспорта, может быть следую-

щее обстоятельство: является день наблюдений будним или выходным. Этот фактор (назовем его фактор B) имеет два уровня: B_1 – средняя скорость движения в будние дни, и B_2 – средняя скорость дви-

⁵Базилевский М.П., Gefan Г.Д. Эконометрика (продвинутый уровень): учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2016. 108 с. / Bazilevsky M.P., Gefan G.D. Econometrics (advanced level): Learning aids. Irkutsk: Publishing House of IrGUPS, 2016, 108 p.



жения в выходные дни. При однофакторном дисперсионном анализе на каждом уровне фактора A приходится проводить повторные наблюдения, чтобы найти групповые дисперсии. При двухфакторном дисперсионном анализе с повторениями (традиционный подход) каждой паре уровней факторов $A_k B_i$ ($k = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, l$) соответствует N измерений $x_{ki}^{(1)}, x_{ki}^{(2)}, \dots, x_{ki}^{(N)}$, общее число измерений равно $n = mlN$. Определяются следующие величины:

а) средняя для каждой пары уровней факторов:

$$\bar{x}_{ki} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{ki}^{(p)}; \quad (7)$$

б) групповые средние по столбцам и по строкам:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \bar{x}_{ki}, \quad \bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{x}_{ki};$$

в) общая средняя:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^l \bar{x}_{ki};$$

г) полная вариация:

$$SST = \sum_{p=1}^N \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^l (x_{ki}^{(p)} - \bar{x})^2;$$

д) вариация, связанная с фактором A :

$$SSA = lN \sum_{k=1}^m (\bar{x}_k - \bar{x})^2;$$

е) вариация, связанная с фактором B :

$$SSB = mN \sum_{i=1}^l (\bar{x}_i - \bar{x})^2;$$

ж) вариация, отражающая взаимодействие факторов A и B :

$$SSAB = N \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^l (\bar{x}_{ki} - \bar{x}_k - \bar{x}_i + \bar{x})^2;$$

з) остаточная вариация:

$$SSR = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^l (x_{ki}^{(p)} - \bar{x}_{ki})^2.$$

Выполняется правило разложения как для самих вариаций –

$$SST = SSA + SSB + SSAB + SSR,$$

так и для их числа степеней свободы –

$$Nml - 1 = (m - 1) + (l - 1) + (m - 1)(l - 1) + ml(N - 1).$$

Для проверки гипотез о значимости факторов рассчитываются вариации на одну степень свободы:

$$MSA = \frac{1}{m - 1} SSA; \quad MSB = \frac{1}{l - 1} SSB;$$

$$MSAB = \frac{1}{(m - 1)(l - 1)} SSAB;$$

$$MSR = \frac{1}{ml(N - 1)} SSR.$$

Для заданного уровня значимости α : фактор A признается значимым, если

$$MSA/MSR > F_{cr}(\alpha, m - 1, ml(N - 1));$$

фактор B признается значимым, если

$$MSB/MSR > F_{cr}(\alpha, l - 1, ml(N - 1));$$

взаимодействие факторов признается зна-



чимым, если

$$MSAB/MSR >$$

$$> F_{cr}(\alpha, (m-1)(l-1), ml(N-1))$$

Для обращения к надстройке «Анализ данных» (режим «Двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями») данным, представленным в табл. 1, необходимо придать соответствующую структуру. Во-первых, данные, относящиеся к будним и выходным дням, необходимо расположить отдельно, в смежных диапазонах. Во-вторых, каждой паре уровней факторов должно соответствовать одинаковое число наблюдений. Поскольку в данных присутствуют только три выходных дня, необходимо оставить такое же количество будних дней (мы оставили среду, четверг и пятницу второй недели наблюдений). Таким образом, $m = 6$; $l = 2$; $N = 3$, общее число наблюдений $n = 36$. Итоговые результаты представлены в табл. 2.

Проанализируем результаты, представленные в табл. 2. Сначала следует проверить, существует ли взаимодействие между факторами A (время суток) и B (будний/выходной день). Чтобы определить

наличие эффекта взаимодействия при заданном уровне значимости (0,05), применяется следующий критерий: нулевая гипотеза об отсутствии эффекта взаимодействия отклоняется, если вычисленное значение F_{AB} больше критического (см. строка 3 столбец 6 табл. 3). В данном случае это именно так, хотя значение F_{AB} весьма близко к критическому, что свидетельствует о наличии слабого взаимодействия между факторами (при другом уровне значимости гипотеза может оказаться принятой). Теперь необходимо проанализировать главные эффекты.

В табл. 3 фактору A соответствует строка 2, фактору B – строка 1. В обоих случаях требуемое условие значимости фактора выполняется с большим запасом. Следовательно, и время суток, и фактор выходного дня оказывают существенное влияние на среднюю скорость движения транспорта. Коэффициент детерминации составляет

$$\eta^2 = \frac{SSA + SSB}{SST} = 0.652.$$

Таблица 2

Двухфакторный 0 дисперсионный анализ с повторениями

Table 2

Two-factor analysis of variance with repetitions

Номер строки / Line no.	Источник Вариации / Source of variance	SS	df	MS	F	F _{крит.}
1	2	3	4	5	6	7
1	Выборка / Sample	177,778	1	177,7778	17,0667	4,259677
2	Столбцы / Columns	597,222	5	119,4444	11,4667	2,620654
3	Взаимодействие / Interaction	163,889	5	32,77778	3,146667	2,620654
4	Внутри / Within	250	24	10,41667	–	–
5	Итого / Total	1188,89	35	–	–	–



Регрессионная модель с фиктивными переменными, отвечающими за учет двух качественных факторов

В дополнение к переменным t_j ($j = 1, 5$), отвечающим за время суток (6), введем переменную

$$v = \begin{cases} 1, & B = B_1, \\ 0, & B = B_2, \end{cases}$$

где $B = B_1$ – будний день, $B = B_2$ – выходной день.

Оценка модели регрессии будет иметь вид

$$\bar{x}_{ki} = \sum_{j=1}^{m-1} a_j^* t_j + b^* v + d^*, \quad k = 1, 2, \dots, m, \\ i = 1, 2, \dots, l.$$

Однако левые части этих уравнений уже не будут тождественно равны соответствующим групповым средним (7). Действительно, используя данные табл. 1, преобразованные так, как это описано в предыдущем пункте, и обратившись к

надстройке «Анализ данных» (режим «Регрессия»), получим:

$$\bar{x}_{ki} = -10t_1 - 10t_2 - 3.33t_3 - 2.5t_4 - \\ - 0.83t_5 - 4.44v + 47.2. \quad (8)$$

Данное уравнение, в частности, показывает, что средняя скорость движения в будние дни в среднем на 4,44 км/ч меньше, чем в выходные (что точно соответствует исходным данным). Вариация, объясняемая регрессией, составляет 775 (это точно соответствует сумме факторных вариаций $SSA+SSB$ в модели двухфакторного дисперсионного анализа, рассмотренной в предыдущем пункте), а остаточная вариация 413,889 совпадает с суммой $SSR+SSAB$. Коэффициент детерминации, конечно, имеет то же самое значение – $r^2 = 0,652$. Заметим, что с введением переменной v , несмотря на уменьшение числа наблюдений, используемых в модели, качество регрессии возросло почти вдвое (с 66 до 36).

Регрессионная модель, описывающая влияние качественных и количественных факторов

Рассмотрим еще один фактор, влияющий на среднюю скорость движения транспорта по Глазковскому мосту – общий уровень пробок в городе Иркутске, оцениваемый по 10-балльной шкале (1 балл – дороги свободны, 10 баллов – город «стоит»). Используем тот же набор данных, с которым мы работали, когда иллюстрировали двухфакторный дисперсионный анализ, дополнив этот набор данными по общему уровню пробок u .

В табл. 3 в ячейках, стоящих на пересечении уровней факторов A и B , в нижнем правом углу указана средняя скорость движения, а в левом верхнем углу приведены значения общего уровня пробок.

В отличие от факторов A и B (время суток и будний/выходной день) показатель общего уровня пробок u представляется целесообразным рассматривать как количественную переменную регрессионной модели. Действительно, если принять общий уровень пробок за качественный фактор, то модель дисперсионного анализа станет трехфакторной (причем третий фактор будет иметь 10 градаций), а в регрессионной модели появится 9 (!) дополнительных переменных. При введении же дополнительной количественной переменной в регрессионную модель последняя усложняется весьма незначительно. Оценка такой модели будет иметь вид:



Таблица 3

Двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями

Table 3

Two-factor analysis of variance with repetitions

Фактор / Factor	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
Будние дни / Week days: $B = B_1$ ($v = 1$)	3 25	4 30	2 45	4 45	3 45	1 45
	2 30	4 30	5 40	6 35	3 45	1 45
	2 30	3 40	5 35	5 40	5 40	1 45
Выходные дни / Days off: $B = B_2$ ($v = 0$)	2 40	2 35	3 45	3 45	2 45	1 45
	1 40	2 35	2 45	2 45	2 45	2 45
	1 45	2 40	3 40	2 45	2 45	2 45

$$\bar{x}_{ki,u} = \sum_{j=1}^{m-1} a_j^* t_j + b^* v + c^* u + d^*,$$

$$(k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, l),$$

С использованием данных табл. 3 результат оказывается следующим:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{ki} = & -8.89t_1 - 6.66t_2 + 1.12t_3 + \\ & + 2.7t_4 + 2.51t_5 - 1.61v - \\ & - 2.23u + 48.8. \end{aligned} \quad (9)$$

Введение дополнительной переменной u повысило качество регрессии: коэффициент детерминации r^2 достиг значения 0,751. Однако с точки зрения точности оценивания коэффициентов регрессии ситуация ухудшилась: коэффициент при переменной v значительно уменьшился (по

модулю) и перестал соответствовать реальному различию средних скоростей в будние и выходные дни. Это является следствием того, что новая переменная u достаточно тесно коррелирует с переменной v (уровень пробок в будни выше, чем в выходные). Корреляция объясняющих переменных в модели регрессии является вредным явлением, она снижает точность их оценивания и возможность их содержательной интерпретации [7]. В нашем случае, как показывает t -тест, коэффициент при переменной v в уравнении (9) вообще оказывается незначимым. Тем не менее, по основному результату (точность предсказания значения объясняемой переменной) оценка (9) будет более предпочтительной, чем оценка (8).

Заключение

На частном примере проиллюстрирована определенная общность и различия двух подходов к анализу данных: дисперсионного и регрессионного. Результаты, получаемые на основе дисперсионного анализа, могут быть воспроизведены в рамках анализа модели регрессии, в которой влияние качественных факторов описывается с помощью фиктивных объясняющих переменных. При этом качество ре-

грессии описывается коэффициентом детерминации, который (на языке дисперсионного анализа) представляет собой отношение факторной и полной вариаций (дисперсий). Одной из серьезных проблем регрессионного анализа является корреляция объясняемых переменных, которая снижает точность оценивания коэффициентов регрессии и возможности их содержательной интерпретации.



Библиографический список

1. Доугерти К. Введение в эконометрику; 3-е изд. М.: ИНФРА-М, 2009. 465 с.
2. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ; пер. с англ.; 3-е изд.; в 2 кн. М.: ИД «Вильямс», 2007. 912 с.
3. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ; пер. с англ. М.: Мир, 1980. 456 с.
4. Как работают Яндекс. Пробки [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/company/technologies/yaprobki/> (25.11.2017).
5. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ; 2-е изд.; в 2 кн. М.: Финансы и статистика. Кн. 1 – 1986; кн. 2 – 1987. 239 с.
6. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия; пер. с англ.; в 2 вып. М.: Финансы и статистика, 1982. Вып. 1 – 349 с.; вып. 2 – 239 с.
7. Gefan G.D. Применение корреляционно-регрессионного анализа как направление исследовательской деятельности при обучении эконометрике // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4 (48). С. 92–97.

References

1. Dougherty K. *Vvedenie v ekonometriku* [Introduction to Econometrics]. Moscow: INFRA-M Publ., 2009, 465 p. (in Russian)
2. Dreiper N., Smit G. *Prikladnoi regressiionnyi analiz* [Applied regression analysis]. Moscow: Vil'yams Publ., 2007, 912 p.
3. Seber Dzh. *Lineinyi regressiionnyi analiz* [Linear regression analysis]. Moscow: Mir Publ., 1980, 456 p.
4. *Kak rabotayut Yandeks. Probki* [How yandex.probki works]. Available at: <https://yandex.ru/company/technologies/yaprobki/> (accessed 25 November 2017).
5. Vuchkov I., Boyadzhieva L., Solakov E. *Prikladnoi lineinyi regressiionnyi analiz* [Applied linear regression analysis]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 1986–1987. (in Russian)
6. Mosteller F., T'yuki Dzh. *Analiz dannykh i regressiya*; [Analysis of data and regression]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 1982.
7. Gefan G.D. The use of correlation and regression analysis as research activities direction at teaching econometrics. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2015, no. 4 (48), pp. 92–97. (in Russian)

Критерии авторства

Гефан Г.Д., Базилевский М.П. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Gefan G.D., Bazilevsky M.P. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 04.12.2017 г.

The article was received 04 December 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.052.2

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-69-88>

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ PON И LR-PON. ЧАСТЬ I

© Е.П. Ионикова¹, В.П. Шувалов²

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ),

Российская Федерация, 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В данной работе рассмотрены схемы обеспечения показателей надежности PON, представленные в рекомендациях ITU-T G.983.1, G.983.5 и G.989.1, а также модернизированные схемы рекомендации ITU-T G.983.1. Проанализированы экономичные схемы обеспечения показателей надежности, такие как «защита соседа», одиночное кольцо, двойное кольцо и гибридные топологии, основанные на использовании топологий «дерево» и «кольцо». Произведен сравнительный анализ представленных схем защиты. **МЕТОДЫ.** Учитывая структуру каждой схемы защиты, разработаны структурные диаграммы надежности, на основе которых рассчитаны коэффициенты недоступности. Вычисления произведены с помощью математической программы MathCAD.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. Наименьшие коэффициенты недоступности получены для сетей с использованием схем защиты типов C и D₁, так как эти схемы защиты предусматривают дублирование всех элементов сети. Если не брать во внимание PON без защиты, наибольший коэффициент недоступности предсказан для сетей с использованием схемы защиты типа A, что обусловлено наличием резервирования только магистрального кабеля. **ВЫВОДЫ.** При использовании той или иной схемы защиты оператор может обеспечить требуемый уровень показателя надежности PON и LR-PON. Однако при проектировании и развертывании сети должны учитываться не только капитальные затраты, но и оцениваться будущие эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: PON, LR-PON, надежность, NG-PON2, SR, DR, «защита соседа», гибридная защита, RBD, коэффициент доступности.

Формат цитирования: Ионикова Е.П., Шувалов В.П. Анализ методов обеспечения показателей надежности сетей PON и LR-PON. Часть I // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 69–88. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-69-88

ANALYSIS OF METHODS ENSURING PON AND LR-PON NETWORK RELIABILITY INDICATORS. PART I

E.P. Ionikova, V.P. Shuvalov

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS),

86 Kirov St., Novosibirsk 630102, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The paper deals with the circuits ensuring PON reliability indicators presented in ITU-T Recommendations G.983.1, G.983.5, G.989.1 and updated circuits of ITU-T G.983.1 recommendations. Analysis is given to the following economical circuits ensuring reliability indicators: “neighboring protection”, a single ring, a dual ring and hybrid topologies based on the use of “tree” and “ring” topologies. The presented protection circuits are compared.

METHODS. Given the structure of each protection circuit, structural reliability diagrams are developed and unavailability factors are calculated. Calculations are performed using the mathematical program MathCAD. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The lowest unavailability factors are obtained for the networks using protection circuits of types C and D₁, since these protection circuits provide for the duplication of all network elements. If PON without protection is not taken into account, the highest unavailability factor is predicted for the networks using the type A protection circuit. This is due to the availability of backup of the backbone cable only. **CONCLUSIONS.** When using some or another protection circuit the operator can provide the required level of the reliability indicator PON and LR-PON. However, when designing and deploying a network the future operating costs should be evaluated in addition to capital costs.

Keywords: PON, LR-PON, reliability, NG-PON2, SR, DR, “neighboring protection”, hybrid protection, RBD, availability factor

¹Ионикова Елена Петровна, аспирант, e-mail: ionikova.lena@mail.ru

Elena P. Ionikova, Postgraduate student, e-mail: ionikova.lena@mail.ru

²Шувалов Вячеслав Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой передачи дискретных коммуникаций и метрологии, e-mail: shvp04@mail.ru

Vyacheslav P. Shuvalov, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Transmission of Discrete Communications and Metrology, e-mail: shvp04@mail.ru



For citation: Ionikova E.P., Shuvalov V.P. Analysis of methods ensuring PON and LR-PON network reliability indicators. Part I. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 69–88. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-69-88

Введение

С ростом популярности технологии пассивных оптических сетей (Passive Optical Network – PON) все более актуальны требования беспрепятственного получения максимальной пропускной способности при минимально возможных затратах. Надежность сети стала сегодня основным ориентиром для поставщиков услуг. Однако обычная архитектура сетей оптического доступа имеет низкую надежность сети, что приводит к потере данных в случае сбоев в оптических компонентах как в оборудовании, так и в среде передачи. Поэтому необходимо разработать архитектуры, которые обеспечат требуемую надежность ($\geq 99,999$), не жертвуя сетевой пропускной способностью. Особенно важным вопрос надежности является для сетей доступа большого радиуса действия (Long-reach PON, LR-PON), которые позволяют увеличить масштаб развертывания по сравнению с классическими PON [1, 2]. Это связано с тем, что коэффициент надежности напря-

мую зависит от масштаба развертываемой сети. Наиболее высокие требования к отказоустойчивости сети предъявляют бизнес-пользователи, для которых потеря трафика даже на короткое время может повлечь значительный финансовый ущерб и повлиять на репутацию. Именно поэтому они согласны платить за высокие показатели готовности сети, гарантированные оператором связи. При этом оператор стремится найти компромисс между высокими показателями коэффициента готовности сети и капитальными и эксплуатационными расходами [3–7].

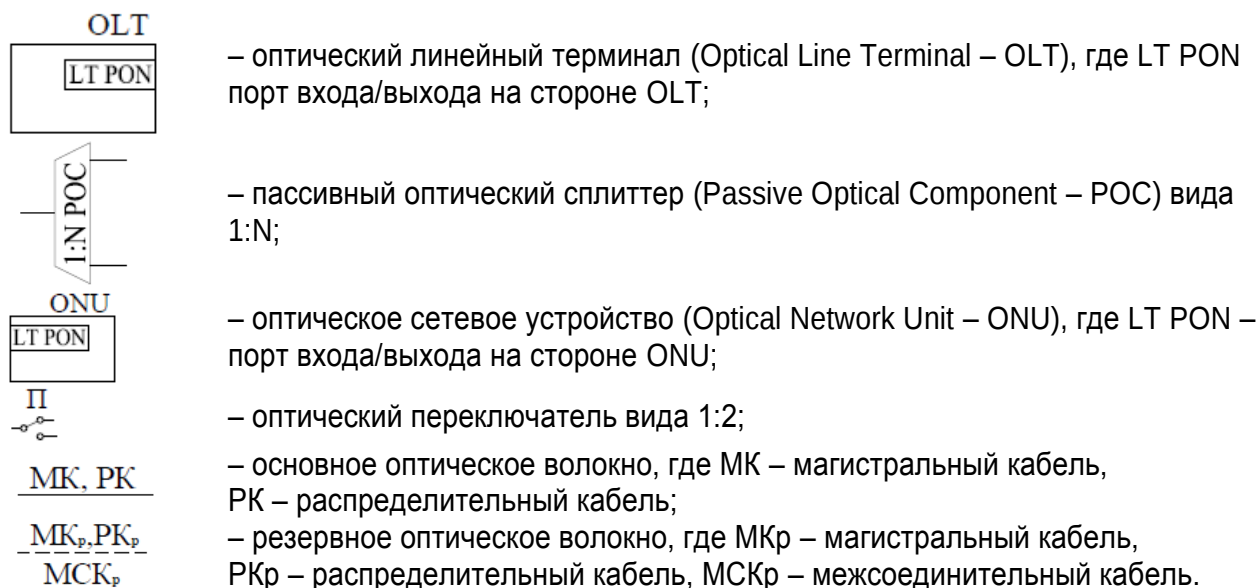
Цель данной статьи заключается в анализе различных схем защиты сети на основе технологии PON с точки зрения ее надежности и, соответственно, в рассмотрении возможности их использования для сетей LR-PON. Кроме того, необходимо сравнить представленные схемы по другим показателям.

Схемы защиты сетей PON

Разработки надежных схем реализации PON сетей ведутся уже несколько десятилетий. Выделяют три этапа эволюции подходов к защите пассивных оптических сетей [8]. Первым этапом принято считать стандарт, описанный в рекомендации G.983.1, опубликованный в конце 1990-х годов. Главная идея данного стандарта заключается в дублировании элементов сети, что позволяет добиться требуемых коэффициентов готовности. Однако использование данного стандарта неизбежно влечет за собой большие капитальные затраты. Следует учитывать, что стоимость элементов, используемых клиентами совместно, делится между ними, в то время как стоимость элементов оптической распределительной сети (Optical Distribution Network – ODN) полностью ложится на плечи кон-

кретного пользователя. Главной задачей, которая решалась на втором этапе, был поиск способов снижения капитальных затрат в расчете на одного пользователя сети. На этом этапе были разработаны кольцевые структуры, структуры с «защитой соседа», схемы на основе самовосстановления и другие. Помимо необходимости снижения капитальных затрат в расчете на одного пользователя необходимо решать задачи по снижению эксплуатационных затрат, связанных с обеспечением построения отказоустойчивых сетей доступа. Это третий этап, относящийся к созданию отказоустойчивых и эффективных сетей доступа [9].

Введем следующие графические обозначения:



Топология PON без какой-либо защиты представлена на рис. 1.

К стандартным архитектурам защиты, разработанным в рекомендации G.983.1 в 1998 году, относятся схемы защиты типа А, В, С, D [10]. Общий принцип всех схем защиты – это дублирование всех

или же части компонентов [11]. Эти четыре схемы отличаются степенью защиты PON, стоимостью и сложностью реализации.

Тип защиты А. Для данного типа защиты дублируется только магистральный кабель. Топология PON с защитой типа А представлена на рис. 2.

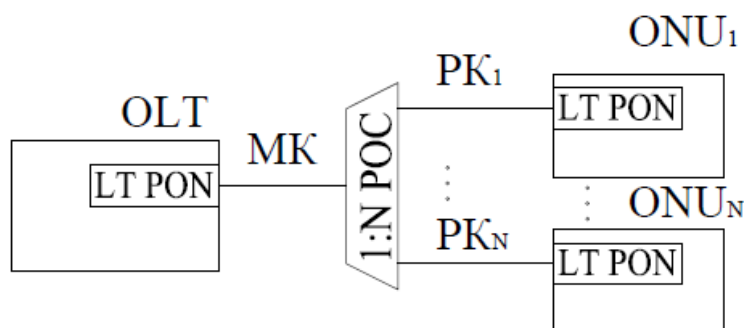


Рис. 1. Архитектура незащищенной PON
Fig. 1. Architecture of unprotected PON

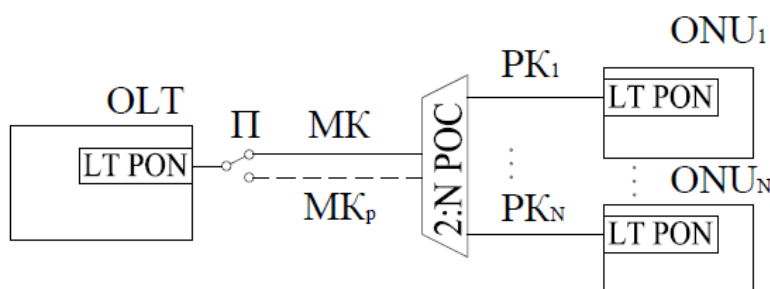


Рис. 2. Архитектура PON с защитой типа А
Fig. 2. PON architecture with type A protection



При обнаружении обрыва OLT переключается с рабочего магистрального кабеля на резервный через оптический переключатель (П) вида 1:2, расположенный на OLT. При этом на время переключения сигнал пропадает.

Тип защиты В дублирует общую часть PON, а именно МК, и оптические интерфейсы на OLT, расположенном в центральном офисе (Central Office – CO). В данном случае основной OLT работает в нормальном режиме, а резервный OLT – в режиме ожидания (ненагруженный резерв). Для переключения сигнала с рабочего интерфейса на резервный используется селектор. При этом на время переключения сигнал пропадает. Топология PON с защитой типа В представлена на рис. 3.

В сравнении со схемой А в схеме В обеспечивается дополнительная защита от отказов интерфейса OLT.

Тип защиты С – это защита с полным дублированием сети (1+1). В данном случае оба OLT работают в нормальном режиме, то есть резервный OLT находится в нагруженном резерве, что обеспечивает быстрое время восстановления. Топология PON с защитой типа С представлена на рис. 4.

Тип защиты D обеспечивает независимое дублирование МК и РК, что позволяет создать полную (D_1) или частичную (D_2) защиту. Защита типа D_1 разработана преимущественно для бизнес-пользователей, а D_2 – для частных клиентов. В обоих случаях основной и резервный OLT работают в нормальном режиме, то есть резервный OLT находится в нагруженном резерве, что обеспечивает быстрое время восстановления. Топологии PON с защитой типа D_1 и D_2 представлены на рис. 5.

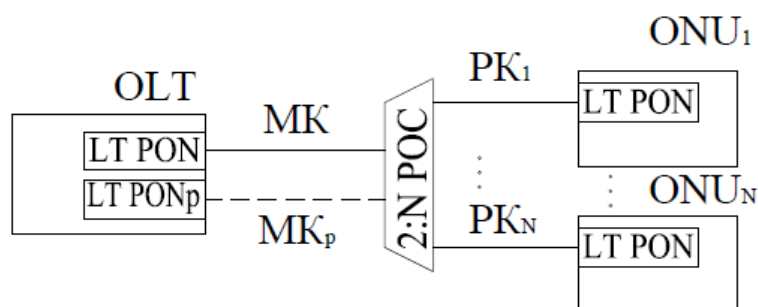


Рис. 3. Архитектура PON с защитой типа В
Fig. 3. PON architecture with type B protection

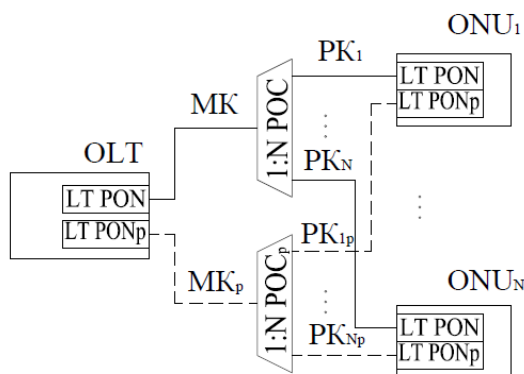


Рис. 4. Архитектура PON с защитой типа С
Fig. 4. PON architecture with type C protection

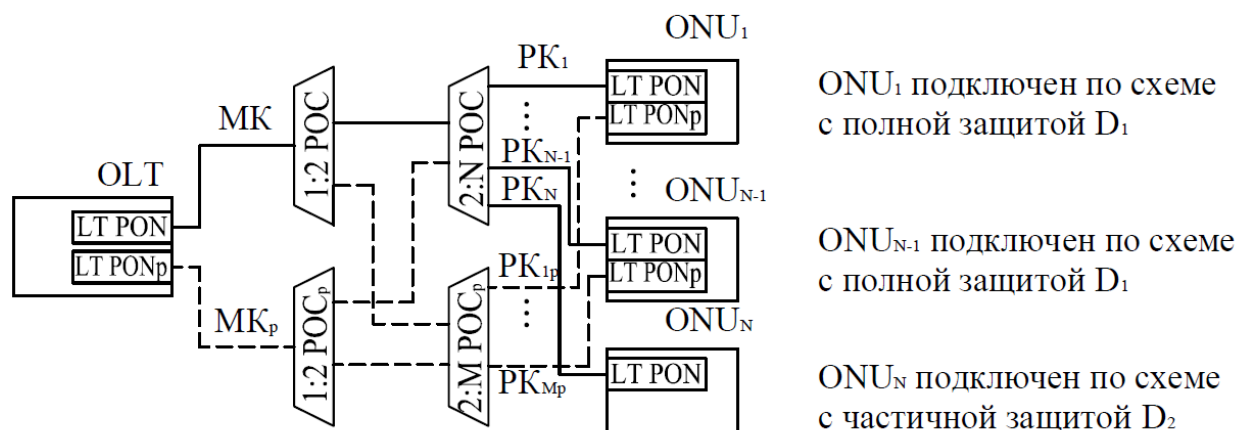


Рис. 5. Архитектура PON с защитой типа D_1 и D_2
Fig. 5. PON architecture with type D_1 and D_2 protection

В схеме увеличилось число резервных модулей, что привело к увеличению коэффициента готовности K_r , однако увеличилась и сложность управления сетью.

В рекомендации G.983.5 в качестве основных вариантов защиты рассматриваются типы В и С, описанные в G.983.1 [12]. Тип В в рекомендации G.983.5 полностью соответствует G.983.1, в то время как тип С

в рекомендации G.983.5 предусматривает возможность наличия на сети как защищенных, так и незащищенных OLT и ONU. В рекомендации G.983.5 предусмотрен для типа С вариант защиты X:N (рис. 6) [13]. Здесь X резервных OLT используются для защиты N рабочих. Также предусмотрено дублирование всех или некоторых ONU.

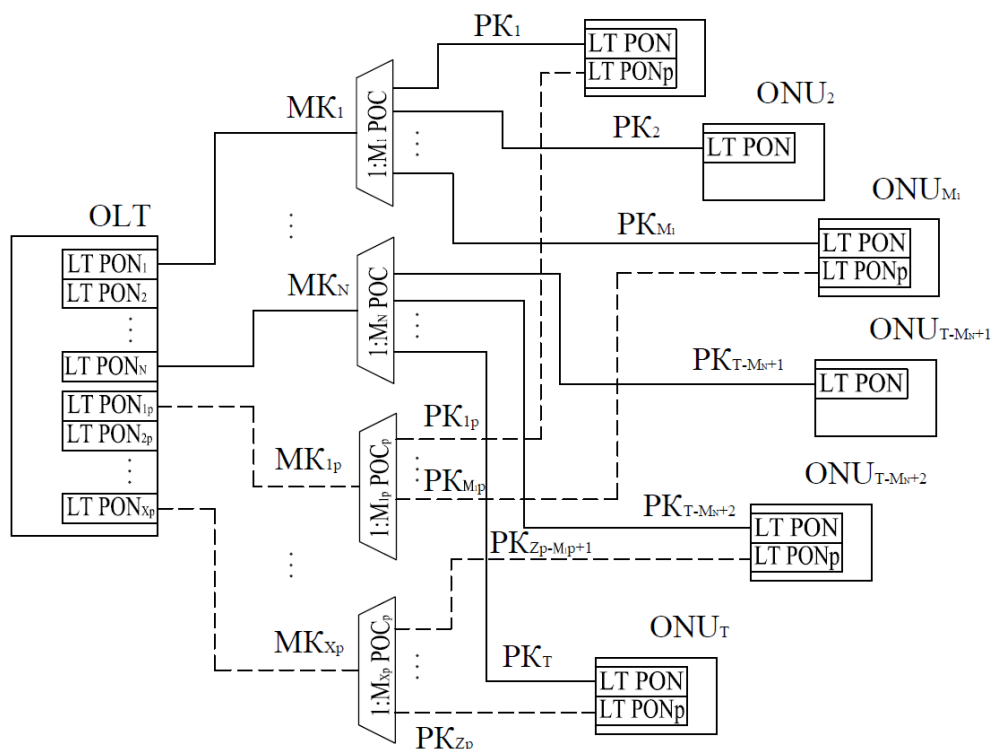


Рис. 6. Архитектура PON с защитой X:N для типа С
Fig. 6. PON architecture with X:N protection for type C



Рекомендация G.989.1 разработана в 2013 году для сетей следующего поколения (Next Generation PON, NG-PON2) со скоростью 40 Гбит/с [14]. Здесь рассматриваются защиты типа В и С, а также новая категория защиты – тип W. Для защиты типа W предлагаются следующие варианты: $1:n$; $(n+1):n$; $2n:n$. В качестве примера на рис. 7 представлена защита W $2n:n$.

Здесь OLT подразделяются на две группы – рабочая и резервная. Если отказ случился в рабочей группе, резервная обеспечит связь, известив о необходимости перестройки ONU на частоты резервного OLT.

Модернизация защиты, представленной в рекомендации G.983.1, предлагаемая в [15], рассчитана на сети NG-PON2 [16–18] (рис. 8). К таким сетям относятся WDM-PON и TWDM-PON, т.е. сети с частотным уплотнением (Wavelength Division Multiplexing PON, WDM-PON) и с временным и частотным уплотнением (Time Wavelength Division Multiplexing PON, TWDM-PON).

В схеме А (рис. 8, а) для частных клиентов дублируется МК, в то время как для бизнес-пользователей дублируются МК, РК и приемопередатчик ONU. Для переключения OLT с рабочего магистрального кабеля на резервный требуются переключатели, конфигурации которых для WDM и TWDM-PON несколько отличаются [15].

В схеме В (рис. 8, б) для частных клиентов дублируется интерфейс OLT, МК, в то время как для бизнес-пользователей дублируются интерфейс OLT, МК, РК и приемопередатчик ONU.

Схема защиты С рассчитана на 100%-ный охват защитой применительно к бизнес-пользователям (рис. 8, с). В схеме защиты Д также обеспечивается 100%-ный охват защитой ONU бизнес-пользователей, защита OLT и магистрального кабеля для частных пользователей (рис. 8, d). В схеме используется два дополнительных переключателя, расположенных перед сплиттерами.

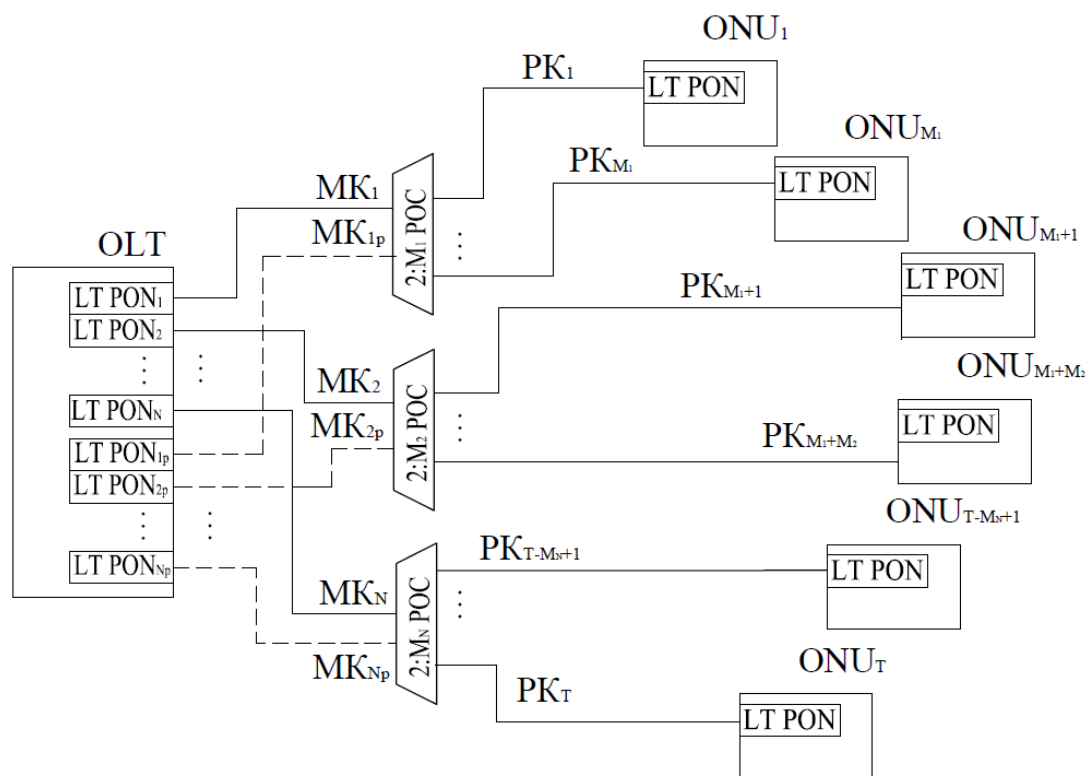


Рис. 7. Архитектура PON с защитой типа W. Модель $2n:n$
Fig. 7. PON architecture with type W protection. Model $2n:n$

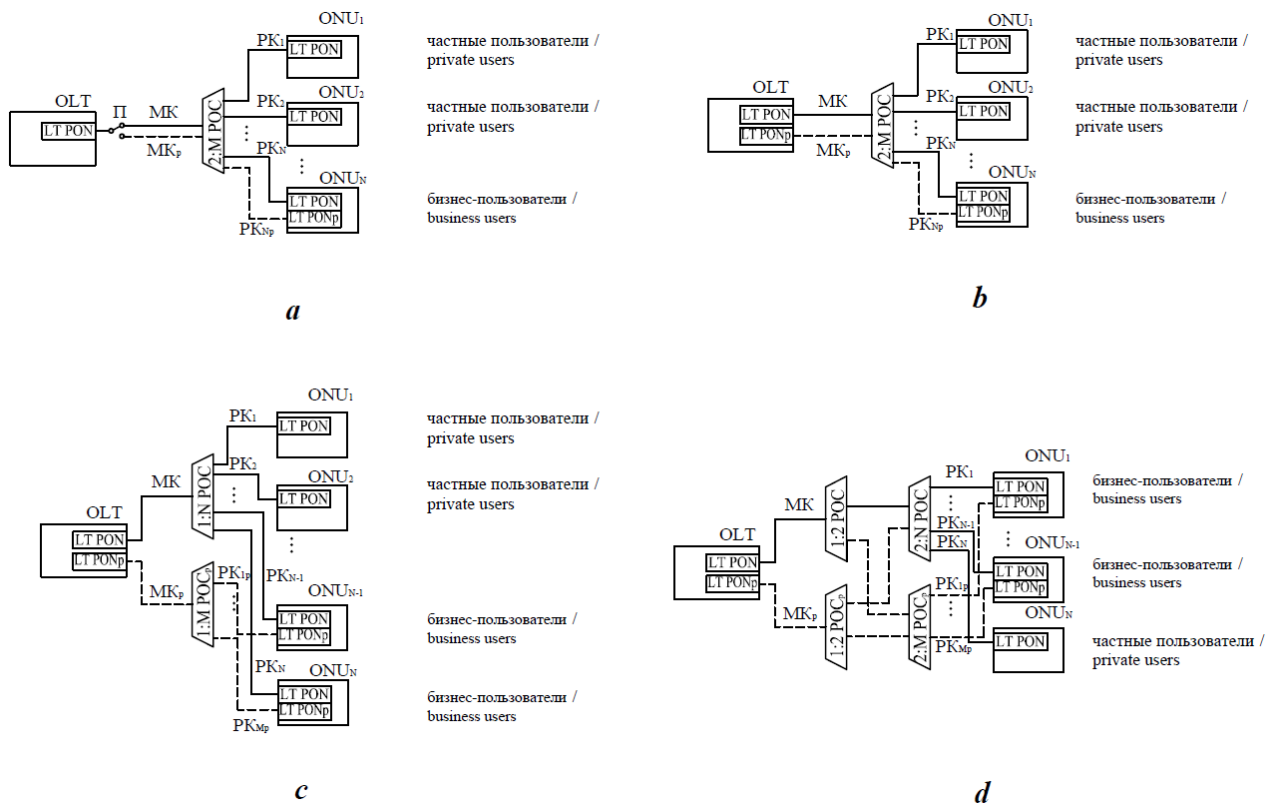


Рис. 8. Модернизированные схемы защиты G.983.1: защита типа A (a), B (b), C (c), D (d)
Fig. 8. Upgraded protection circuits G.983.1: protection of type A (a), B (b), C (c), D (d)

Рост требований к показателям надежности влечет за собой и поиски новых более экономичных реализаций надежных сетей.

PON с «защитой соседа» (*Neighboring Protection – NP*). Основным принципом «защиты соседа» является то, что два соседних ONU защищают друг друга при использовании межсоединительных волокон. Два географически непересекающихся волокна позволяют защитить МК от обрыва между OLT и удаленным узлом (Remote Node, RN). Каждые два соседних ONU образуют пару для осуществления защиты распределительных волокон. Эта схема защиты экономична, так как позволяет снизить затраты на развертывание волокон в PON [19]. Топология PON с «защитой соседа» представлена на рис. 9.

PON с защитой на основе одного кольца (*Single Ring – SR*). Чтобы избежать

значительного дублирования оптической среды, используется кольцевая топология [19, 20]. В данном случае реализовано кольцо на уровне фидера, дерево на уровне оптической распределительной сети для каждого пользователя. В случае отказа на каком-либо участке кольца магистральный участок сети начинает функционировать согласно древовидной топологии. Архитектура PON с защитой на основе одного кольца представлена на рис. 10.

PON с защитой на основе двойного кольца (*Dual Ring – DR*). В данном случае реализовано кольцо на уровне фидера и кольцо на уровне ODN для каждого пользователя [20, 21]. В случае отказа на каком-либо участке кольца этот участок сети начинает функционировать согласно древовидной топологии. Архитектура PON с защитой на основе двойного кольца представлена на рис. 11.

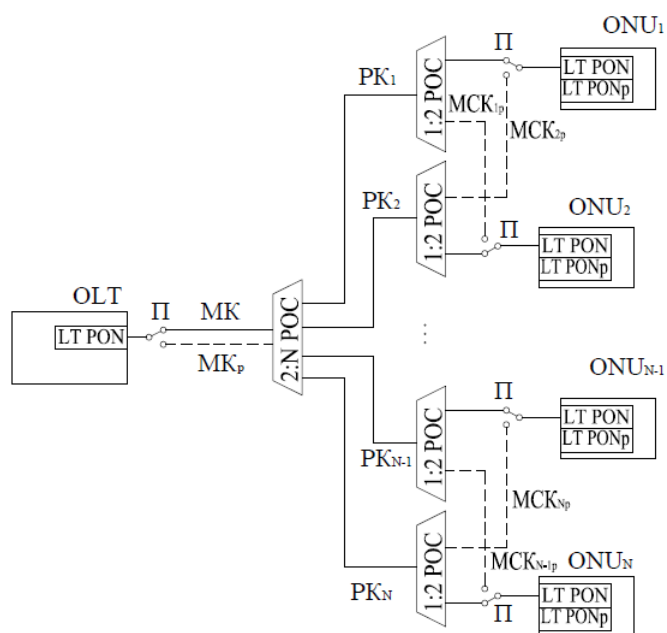


Рис. 9. Архитектура PON с «защитой соседа»
Fig. 9. PON architecture with a “neighboring protection”

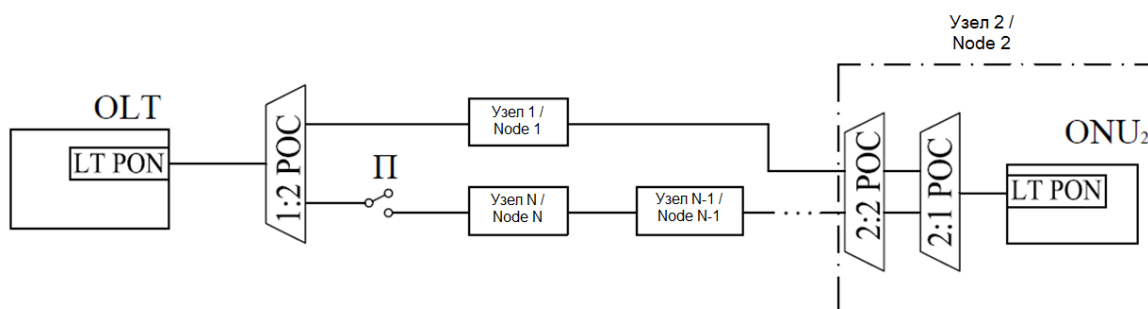


Рис. 10. Архитектура PON с защитой на основе одного кольца
Fig. 10. PON architecture with a single ring-based protection

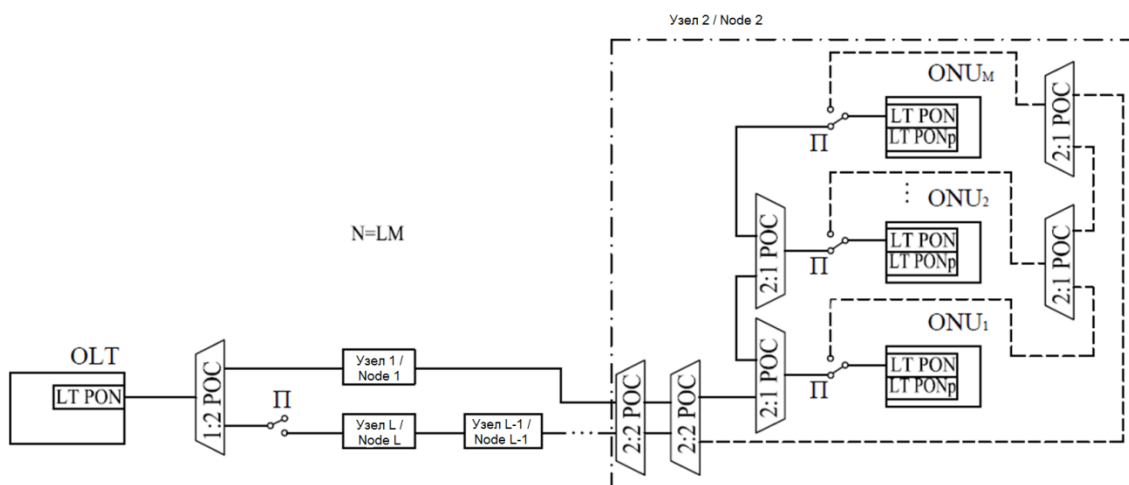


Рис. 11. Архитектура PON с защитой на основе двойного кольца
Fig. 11. PON architecture with a dual ring-based protection



PON с гибридной защитой на основе дерева и звездообразного кольца (Hybrid Tree-and-ring-based – HT). Эта архитектура использует гибридную технологию, основываясь на топологии дерева на уровне фидера и топологии звездообразного кольца на уровне ODN [21, 22]. Чтобы избежать дорогостоящего дублирования распределительного кабеля, данная архитектура дополняется межсоединительными волокнами. Топология PON с гибридной защитой HT представлена на рис. 12.

PON с гибридной защитой на основе кольца и звездообразного кольца (Hybrid Ring- star-based – HR). Эта архитектура использует гибридную технологию на основе топологии кольца на уровне фидера и топологии звездообразного кольца на уровне ODN [21]. В случае отказа на каком-либо участке кольца этот участок сети начинает функционировать согласно древовидной топологии. Аналогично с предыдущей схемой, чтобы избежать дорогостоящего дублирования распределительного кабеля, данная архитектура дополняется межсоединительными волокнами. Топо-

логия PON с гибридной защитой HR представлена на рис. 13.

Схема защиты N:1 на уровне OLT. Эта архитектура позволяет резервировать один дополнительный OLT для каждой N активных OLT. Путем оптимального размещения узлов Metro/Core(MC) друг относительно друга обеспечивается защита для первой ступени разветвления [23, 24]. Если сумма резервных OLT в MC-1 и MC-3 равна числу активных OLT в MC-2, отказ при нарушении в работе MC-2 может быть устранен. Благодаря этой схеме можно произвести полную защиту абонентов MC-2 даже при нехватке резервных OLT в MC-1 и MC-3. Этого можно добиться путем перенаправления одного из активных OLT MC-3 для защиты PON в MC-2, при этом MC-4 может использовать свой резервный OLT для обслуживания этого PON в MC-3. Таким образом, мы позволяем MC-4 делиться своим OLT при отказе, который произошел в MC-2, и в результате мы можем дополнительно уменьшить количество резервных OLT, доступных в системе.

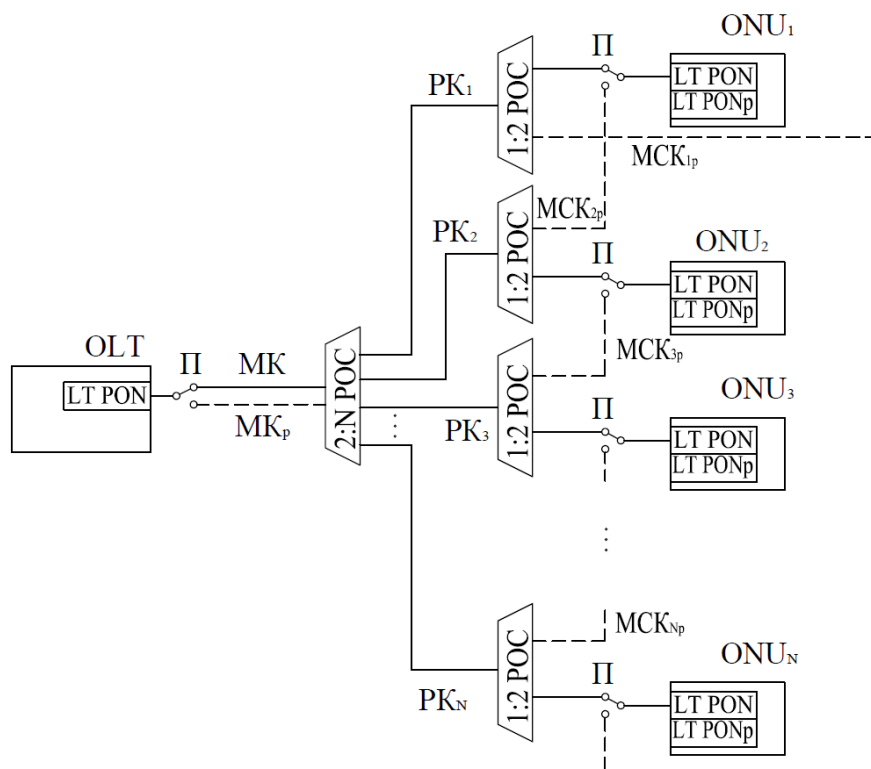


Рис. 12. Архитектура PON с гибридной защитой HT
Fig. 12. PON architecture with a hybrid protection HR

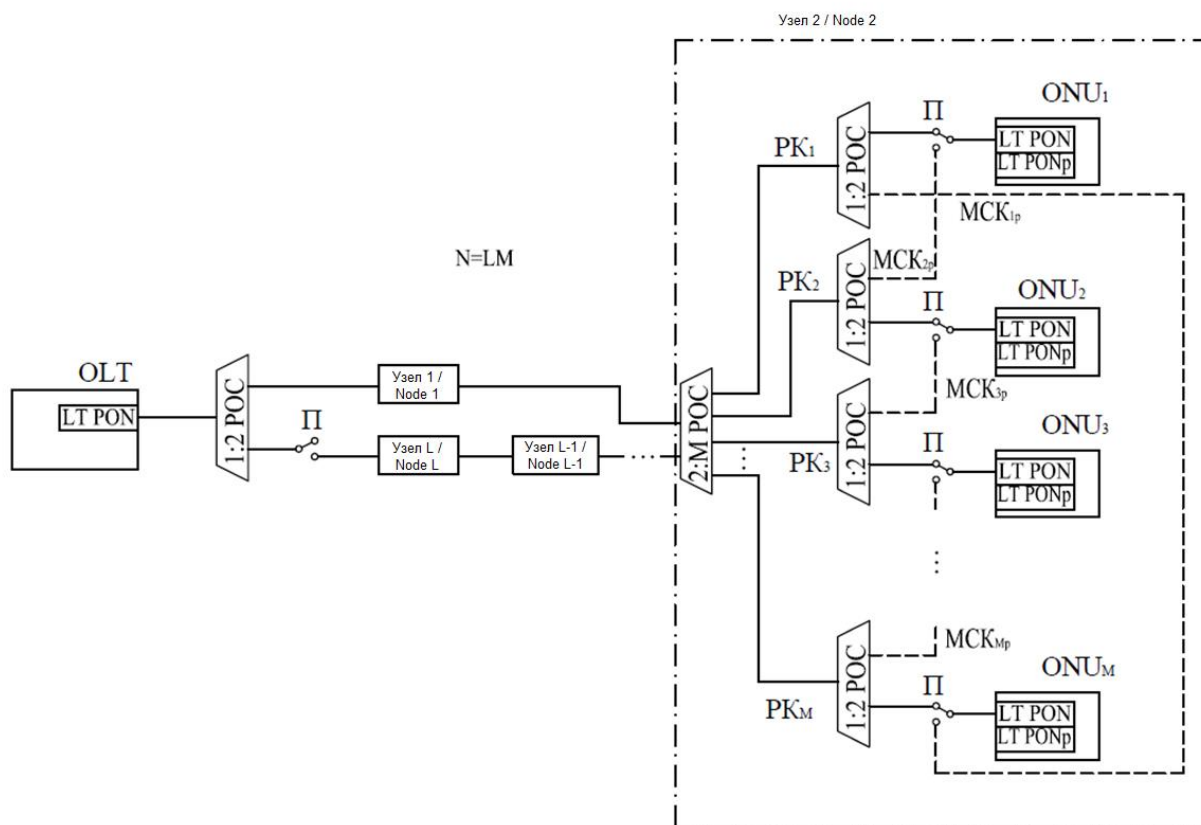


Рис. 13. Архитектура PON с гибридной защитой HR
Fig. 13. PON architecture with a hybrid protection HR

Структурные схемы для расчета надежности

На рис. 14–17 изображены структурные диаграммы надежности (Reliability block diagram – RBD), полученные для рассмотренных сетевых архитектур доступа по оптическому волокну. Структурная диаграмма надежности – это графическое представление надежности системы, благодаря которому можно наглядно представить эффект использования всевозможных конфигураций функционирования и сбоев в

работе системы [25].

RBD незащищенной сети PON представлена на рис. 14. RBD PON с защитой согласно рекомендациям G.983.1, G.983.5 и G.989.1 представлены на рис. 15. На рис. 16 изображены RBD модернизированные схемы рекомендации G.983.1. RBD схем с экономичной защитой представлены на рис. 17.



Рис. 14. RBD незащищенной сети PON
Fig. 14. RBD of unprotected PON network

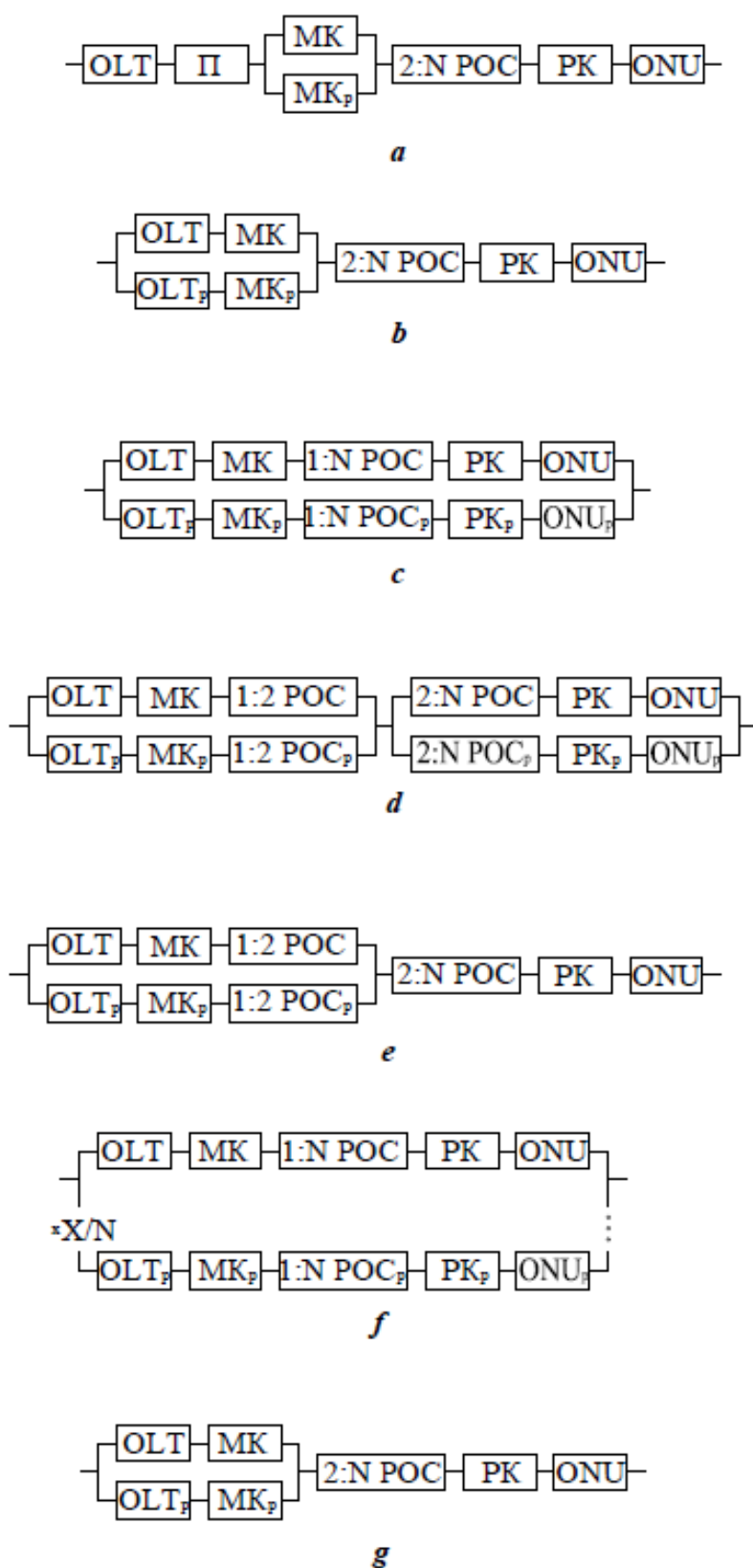


Рис. 15. RBD для схем с защитой типа А (а), В (b), С (c), D₁ (d), D₂ (e),
а также схема защиты С типа X:N (f) и W(g)

Fig. 15. RBD for circuits with the protection of type A (a), B (b), C (c), D₁ (d), D₂ (e),
and a protection circuit C of type X: N (f) and W (g)

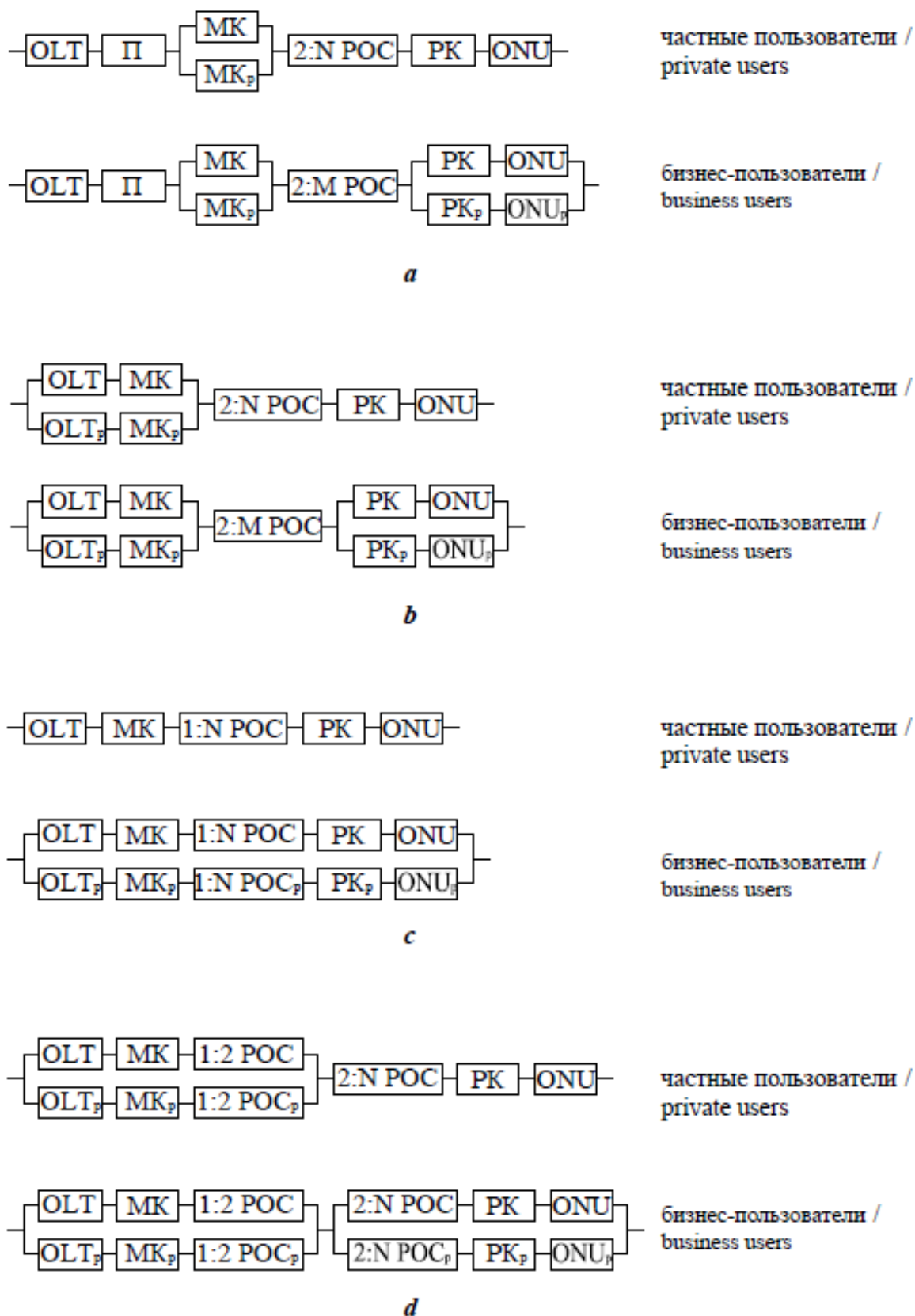


Рис. 16. RBD для модернизированных схем защиты G.983.1. Защита типа А (а), В (b), С (c), D (d)
Fig. 16. RBD for upgraded protection circuits G.983.1. Protection of type A (a), B (b), C (c), D (d)



Рис. 17. RBD для схем: а – с «защитой соседа»; б – с защитой на основе одного кольца; с – с защитой на основе двойного кольца; д – с гибридной защитой на основе дерева; е – с гибридной защитой на основе кольца

Fig. 17. RBD for the circuits: a – with “neighboring protection”; b – with single-ring protection; c – with dual ring protection; d – with hybrid tree (HT) protection; e – with hybrid ring (HR) protection



Определение коэффициентов неготовности схем защиты

Коэффициент неготовности сети – один из важнейших ее показателей, его определение важно для оценки капитальных и эксплуатационных затрат [26]. Коэффициенты неготовности для каждой схемы рассчитывается в соответствии с ее RBD.

В статье рассчитаны коэффициенты неготовности для четырех случаев с точки зрения протяженности и сгруппированности пользователей.

Случай 1. Плотное расположение пользователей в сельской местности с удаленным СО: МК = 99 км; РК = 1 км; МСК = 0,5.

Случай 2. Редкое расположение пользователей в сельской местности с удаленным СО: МК = 80 км; РК = 20 км; МСК = 1.

Случай 3. Редкое расположение пользователей в городской местности: МК = 20 км; РК = 5 км; МСК = 1.

Случай 4. Плотное расположение пользователей в городской местности: МК = 24 км; РК = 1 км; МСК = 0,5.

Коэффициенты неготовности каждого компонента взяты в соответствии с данными [25] и представлены в табл. 1.

Для большинства представленных схем коэффициент неготовности не зависит от общего числа пользователей в системе. Однако для схем с использованием кольцевой топологии он зависит от количества узлов в кольце магистрального значения и количества пользователей в распределительном кольце. Для таких схем расчет представлен для восьми пользовате-

лей, причем для схем DR и HR расчет произведен для двух узлов по четыре пользователя в каждом. При этом коэффициенты неготовности для пользователей, входящих в состав разных узлов, также будут различны. В данной статье рассчитан наихудший вариант – с наибольшим коэффициентом неготовности. Кроме того, для схемы типа X:N коэффициент зависит от отношения количества резервных компонентов к основным. Нами это отношение принято равным 1/2. Коэффициент неготовности для схемы защиты N:1 нами не рассчитывается в силу большого количества требуемых исходных данных. Таким образом, полученные коэффициенты неготовности для вышеперечисленных схем для всех 4 случаев представлены в табл. 2.

В литературе [5–7] в качестве требуемого коэффициента готовности взят коэффициент 0,99999. При сопоставлении его с полученными результатами очевидно, что добиться такого показателя возможно только при полном дублировании оптических компонентов (типы защиты C и D₁) и небольших фидерных расстояниях. Таким образом, при увеличении капитальных затрат на развертывание той или иной сети в какой-то момент коэффициент неготовности, а следовательно, и эксплуатационные расходы уменьшаются незначительно. Поэтому при проектировании конкретной оптической сети (в особенности LR-PON) необходимо найти компромисс между капитальными и эксплуатационными затратами.

Таблица 1

Коэффициенты неготовности компонентов

Table 1

Unavailability factors of componenets

Компонент / Component	Коэффициент неготовности / Unavailability factor
OLT	$5,12 \cdot 10^{-7}$
Волокно	$1,37 \cdot 10^{-5}$
1:N POC	$7,20 \cdot 10^{-7}$
1:2 POC	$3,00 \cdot 10^{-7}$
ONU	$1,54 \cdot 10^{-6}$
П	$1,20 \cdot 10^{-6}$



Таблица 2

Коэффициенты неготовности схем защиты

Table 2

Unavailability factors of protection circuits

Тип схемы / Circuit type	Коэффициент неготовности U при / Unavailability factor U at			
	МК = 99, РК = 1, МСК = 0,5	МК = 80, РК = 20, МСК = 1	МК = 20, РК = 5, МСК = 1	МК = 24, РК = 1, МСК = 0,5
Без защиты / Without protection	$13,73 \cdot 10^{-4}$	$13,73 \cdot 10^{-4}$	$3,453 \cdot 10^{-4}$	$3,453 \cdot 10^{-4}$
Тип А / Type А (G.983.1)	$1,951 \cdot 10^{-5}$	$2,792 \cdot 10^{-4}$	$7,255 \cdot 10^{-5}$	$1,778 \cdot 10^{-5}$
Тип В / Type В (G.983.1)	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$2,775 \cdot 10^{-4}$	$7,084 \cdot 10^{-5}$	$1,607 \cdot 10^{-5}$
Тип С / Type С (G.983.1)	$1,885 \cdot 10^{-6}$	$1,885 \cdot 10^{-6}$	$1,192 \cdot 10^{-7}$	$1,192 \cdot 10^{-7}$
Тип D1 / Type D1 (G.983.1)	$1,842 \cdot 10^{-6}$	$1,279 \cdot 10^{-6}$	$8,053 \cdot 10^{-8}$	$1,089 \cdot 10^{-7}$
Тип D2 / Type D2 (G.983.1)	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$2,775 \cdot 10^{-4}$	$7,084 \cdot 10^{-5}$	$1,607 \cdot 10^{-5}$
Тип С / Type С (G.983.5) X:N при/at $\frac{X}{N} = \frac{1}{2}$	$5,086 \cdot 10^{-5}$	$5,086 \cdot 10^{-5}$	$6,416 \cdot 10^{-6}$	$6,416 \cdot 10^{-6}$
Тип W / Type W (G.989.1)	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$2,775 \cdot 10^{-4}$	$7,084 \cdot 10^{-5}$	$1,607 \cdot 10^{-5}$
Тип А / Type А (NG-PON2)	$1,951 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $4,272 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$2,792 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $3,709 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$7,255 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $2,512 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$1,778 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $2,54 \cdot 10^{-6}$ (Б)
Тип В / Type В (NG-PON2)	$1,78 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $2,561 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$2,775 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,998 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$7,084 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $8,002 \cdot 10^{-7}$ (Б)	$1,607 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $8,287 \cdot 10^{-7}$ (Б)
Тип С / Type С (NG-PON2)	$13,73 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,885 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$13,73 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,885 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$3,453 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,192 \cdot 10^{-7}$ (Б)	$3,453 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,192 \cdot 10^{-7}$ (Б)
Тип D / Type D (NG-PON2)	$1,78 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $1,842 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$2,775 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,279 \cdot 10^{-6}$ (Б)	$7,084 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $8,053 \cdot 10^{-8}$ (Б)	$1,607 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $1,089 \cdot 10^{-7}$ (Б)
NP	$7,012 \cdot 10^{-6}$	$6,452 \cdot 10^{-6}$	$5,253 \cdot 10^{-6}$	$5,28 \cdot 10^{-6}$
SR для / for 8 ONU	$1,711 \cdot 10^{-5}$	$2,772 \cdot 10^{-4}$	$7,147 \cdot 10^{-5}$	$1,668 \cdot 10^{-5}$
DR (для 8 ONU, 2 узла по 4) / (for 8 ONU, 2 nodes by 4)	$4,861 \cdot 10^{-6}$	$4,749 \cdot 10^{-6}$	$4,471 \cdot 10^{-6}$	$4,471 \cdot 10^{-6}$
HT (для / for 8 ONU)	$7,012 \cdot 10^{-6}$	$6,373 \cdot 10^{-6}$	$5,247 \cdot 10^{-6}$	$5,28 \cdot 10^{-6}$
HR (для 8 ONU, 2 узла по 4) / (for 8 ONU, 2 nodes by 4)	$4,261 \cdot 10^{-6}$	$4,119 \cdot 10^{-6}$	$3,869 \cdot 10^{-6}$	$3,876 \cdot 10^{-6}$



Сравнительная характеристика схем обеспечения надежности сети

Рассмотренные схемы обеспечения надежности сети отличаются не только конструктивными элементами, но и качественными и количественными характеристиками [13]. Капитальные затраты напрямую зависят от количества используемого оборудования и кабеля [27]. Чем больше дублируемых элементов в сети, тем дороже будет для оператора ее развертывание. Эксплуатационные расходы также зависят

от количества оборудования, а именно, от потребляемой электроэнергии и занимаемых площадей. Однако эти расходы в большей степени зависят от отказоустойчивости сети: потребуется не только приобрести отказавший элемент, заменить его, но и выплатить штраф бизнес-пользователям за прерывание трафика. Сравнительная характеристика предложенных схем представлена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика схем обеспечения надежности сети

Table 3

Characteristic of the network watchdog

Варианты реализации / Implementation variations	Характеристики / Characteristics							
	Защищаемая область / Protected region	Тип защиты / Protection type	Незащищенная область / Unprotected region	Область переключения / Switch region	Быстрое переключение / Rapid switching	Гибкость / Flexibility	Капитальные затраты / Capital costs	Эксплуатационные затраты (штрафы) / Operation costs (penalties)
Тип А / Type A (G.983.1)	Магистральный кабель / Backbone cable	1:1	Интерфейсы OLT и ONU, сплиттер, распределительный кабель / OLT and ONU interfaces, a splitter, a distribution cable	Магистральный кабель / Backbone cable	Нет / No	Плохая / Poor	Низкие / Low	Очень высокие / Very high
Тип В / Type B (G.983.1)	Интерфейс OLT и магистральный кабель / OLT interface and a backbone cable	1:1	Интерфейс ONU, сплиттер, распределительный кабель / ONU interface, a splitter, a distribution cable	Интерфейс OLT и магистральный кабель / OLT interface and a backbone cable	Нет / No	Плохая / Poor	Средние / Average	Высокие / High
Тип С / Type C (G.983.1)	Интерфейсы OLT и ONU, сплиттер, магистральный и распределительный кабели / OLT and ONU interfaces, a splitter, backbone and distribution cables	1+1 1:1	–	Все составляющие / All components	Да / Yes	Хорошая / Good	Высокие / High	Низкие / Low
Тип D1 / TypeD1 (G.983.1)	Интерфейсы OLT и ONU, оба сплиттера, независимая защита магистрального и распределительного кабелей / OLT and ONU interfaces, both splitters, independent protection of backbone and distribution cables	1:1	–	Все составляющие / All components	Нет / No	Хорошая / Good	Очень высокие / Very high	Низкие / Low
Тип D2 / Type D2 (G.983.1)	Интерфейсы OLT, ONU, сплиттер 1:2, магистральный кабель / OLT and ONU interfaces, a splitter 1:2, a backbone cable	1:1	Интерфейс ONU, сплиттер 2:N, распределительный кабель / ONU interface, a splitter 2:N, a distribution cable	Интерфейсы OLT, ONU, сплиттер 1:2, магистральный кабель / OLT and ONU interfaces, a splitter 1:2, a backbone cable	Нет / No	Плохая / Poor	Высокие / High	Низкие / Low
Тип С / Type C (G.983.5)	Некоторые или все интерфейсы OLT и ONU, сплиттер, магистральный кабель и некоторые	X:N	Некоторые интерфейсы OLT и ONU, и некоторые распределительные кабели (либо такой	Некоторые или все интерфейсы OLT и ONU, сплиттер, магистральный	Нет / No	Хорошая / Good	Высокие / High	Средние / Average



	или все распределительные кабели / Some or all OLT and ONU interfaces, a splitter, a backbone cable and some or all distribution cables		области нет) / Some OLT and ONU interfaces, and some distribution cables (or this region does not exist)	кабель и некоторые или все распределительные кабели / Some or all OLT and ONU interfaces, a splitter, a backbone cable and some or all distribution cables				
Тип W / Type W (G.989.1)	Интерфейс OLT и магистральный кабель / OLT interface and a backbone cable	2n:n	Интерфейс ONU, сплиттер, распределительный кабель / ONU interface, a splitter, a distribution cable	Интерфейс OLT и магистральный кабель / OLT interface and a backbone cable	Нет / No	Плохая / Poor	Средние / Average	Низкие / Low
Тип A / Type A (NG-PON2)	Магистральный кабель для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для бизнес-пользователей / Backbone cable for all users, ONU interface and a distribution cable for business users	1:1	Интерфейс OLT и сплиттер для всех, распределительный кабель для частных пользователей / OLT interface, a splitter for all users, a distribution cable for private users	Магистральный кабель для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для бизнес-пользователей / Backbone cable for all users, ONU interface and a distribution cable for business users	Нет / No	Плохая / Poor	Низкие / Low	Низкие / Low
Тип B / Type B (NG-PON2)	Интерфейс OLT и магистральный кабель для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для бизнес-пользователей / OLT interface and a backbone cable for all users, ONU interface and a distribution cable for business users	1:1	Сплиттер для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для частных пользователей / A splitter for all users, ONU interface and a distribution cable for private users	Интерфейс OLT и магистральный кабель для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для бизнес-пользователей / OLT interface and a backbone cable for all users, ONU interface and a distribution cable for business users	Нет / No	Плохая / Poor	Средние / Average	Низкие / Low
Тип C / Type C (NG-PON2)	Интерфейс OLT, сплиттер, магистральный кабель для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для бизнес-пользователей / OLT interface, a splitter, a backbone cable for all users, ONU interface and a distribution cable for business users	1+1 1:1	Интерфейс ONU и распределительный кабель для частных пользователей / ONU interface and a distribution cable for private users	Интерфейс OLT, сплиттер, магистральный кабель для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для бизнес-пользователей / OLT interface, a splitter, a backbone cable for all users, ONU interface and a distribution cable for business users	Да / Yes	Хорошая / Good	Высокие / High	Низкие / Low
Тип D / Type D (NG-PON2)	Интерфейс OLT, оба сплиттера, магистральный кабель для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для бизнес-пользователей / OLT interface, both splitters, a backbone cable for all users, ONU interface and a distribution cable for business users	1:1	Интерфейс ONU и распределительный кабель для частных пользователей / ONU interface and a distribution cable for private users	Интерфейс OLT, оба сплиттера, магистральный кабель для всех, интерфейс ONU и распределительный кабель для бизнес-пользователей / OLT interface, both splitters, a backbone cable for all users, ONU interface and a distribution cable for business users	Нет / No	Хорошая / Good	Очень высокие / Very high	Низкие / Low
NP	Магистральный и распределительный кабели / Backbone and	1:1	Интерфейсы OLT и ONU, сплиттер / OLT and ONU interfaces,	Магистральный и распределительный кабели /	Нет / No	Плохая / Poor	Низкие / Low	Средние / Average



	distribution cables		a splitter	Backbone and distribution cables				
SR	Магистральный кабель / Backbone cable	1:1	Интерфейсы OLT и ONU, оба сплиттера, распределительный кабель / OLT and ONU interfaces, both splitters and a distribution cable	Магистральный кабель / Backbone cable	Нет / No	Плохая / Poor	Низкие / Low	Средние / Average
DR	Магистральный и распределительный кабели, сплиттер 2:1 / Backbone and distribution cables, a splitter 2:1	1:1	Интерфейсы OLT и ONU, оба сплиттера 2:2 / OLT and ONU interfaces, both splitters 2:2	Магистральный и распределительный кабели, сплиттер 2:1 / Backbone and distribution cables, a splitter 2:1	Нет / No	Плохая / Poor	Средние / Average	Средние / Average
N:1	Некоторые интерфейсы OLT сплиттер, магистральный кабель / Some OLT interfaces, a splitter, a backbone cable	1:1	Некоторые интерфейсы OLT, интерфейс ONU, распределительный кабель / Some OLT interfaces, ONU interface, a distribution cable	Некоторые интерфейсы OLT, сплиттер, магистральный кабель / Some OLT interfaces, a splitter, a backbone cable	Да / Yes	Хорошая / Good	Средние / Average	Низкие / Low
HT	Магистральный и распределительный кабели / Backbone and distribution cables	1:1	Интерфейсы OLT и ONU, сплиттер / OLT and ONU interfaces, a splitter	Магистральный и распределительный кабели / Backbone and distribution cables	Нет / No	Плохая / Poor	Средние / Average	Средние / Average
HR	Магистральный и распределительный кабели / Backbone and distribution cables	1:1	Интерфейсы OLT и ONU, оба сплиттера 2:2 и сплиттер 2:1 / OLT and ONU interfaces, both splitters 2:2 and a splitter 2:1	Магистральный и распределительный кабели / Backbone and distribution cables	Нет / No	Плохая / Poor	Средние / Average	Средние / Average

Заключение

В представленной статье рассмотрены различные схемы обеспечения надежности сети и определены коэффициенты неготовности для каждой из них. Проведен сравнительный анализ всех представленных схем с точки зрения отказоустойчивости сети и затрат, необходимых для ее развертывания и обслуживания. Именно благодаря различным конфигурациям развертываемых сетей оператор может обеспечить желаемый уровень готовности сети для того или иного клиента, при

этом эффективно потратив имеющиеся у него средства. При проектировании и развертывании сети должны не только учитываться капитальные затраты, но и оцениваться будущие эксплуатационные расходы. Таким образом, оптимальной надежной схемой защиты считается та, которая минимизирует общую стоимость владения сетью. Анализ методов обеспечения показателей надежности сетей PON и LR-PON с точки зрения требуемых затрат будет произведен во II-й части статьи.

Библиографический список

1. Kavian Y.S., Leeson M.S. Resilient optical network design. Advances in fault-tolerant methodologies // USA: Information Science Reference. 2012. P. 228–250.
2. Farjady F. et al. First WP2 Progress Report [Электронный ресурс]. URL: <http://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/7/318137/080/deliverables/001-DISCUSD22Final.pdf> (07.10.2017).
3. Игнатов А.В., Шувалов В.П. Надежность сетей абонентского доступа LR-PON // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 5. С. 25–30.
4. Громов Ю.Ю., Иванова О.Г., Мосягина Н.Г., Наба- тов К.А. Надёжность информационных систем. Там-

бов: Изд-во ТГТУ, 2010. 160 с.

5. Шувалов В.П., Тимченко С.В. Методы резервирования и восстановления в телекоммуникационных сетях // Надежность функционирования и проблемы информационной безопасности телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта: межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2009. С. 40–44.
6. Егунов М.М., Шувалов В.П. Анализ структурной надёжности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54–60.
7. Егунов М.М., Шувалов В.П. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях //



Вестник СибГУТИ. 2012. № 2. С. 3–10.

8. Chen J., Wosinska L. Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures // IEEE Communications Magazine. 2010. Vol. 48. No. 2. P. 56–65.
9. Machuca C.M., Chen J., Wosinska L. Cost-efficient protection in TDM PONs // IEEE Communications Magazine. 2012. Vol. 50. No. 8. P. 110–117.
10. ITU-Y Rec. G983.1. Broadband Optical Access Systems Based on Optical Network (PON). 1998.
11. Kantor M., Chen J., Wosinska L., Wajda K. Techno-economic analysis of PON protection schemes Proc. // IEEE Broadband Europe, Antwerp, Belgium. 2007.
12. G.983.5(O1/2002). A broadband optical access system with enhanced Survivability. ITU-T Recommendation G.983.5.
13. Шувалов В.П., Егунов М.М., Минина Е.А. Обеспечение показателей надёжности телекоммуникационных систем и сетей. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 168 с.
14. Rec ITU-T G.989.1(2013)/Amd.1(08/2015) 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements.
15. Dixit A., Mahloo M., Lannoo B., Chen J., Wosinska L., Colle D., and Pickavet M. Protection strategies for next generation passive optical networks-2 // Optical Network Design and Modeling: material 18th International Conference. 2014. P. 13–18.
16. OASE Project, D4.2.1: Technical assessment and comparison of next generation optical access system concepts. 2011.
17. Chen J., Chen B., He S. Self-Protection Scheme Against Failures of Distributed Fiber Links in an Ethernet Passive Optical Network // OSA J. Optical Net. 2006. Vol. 5. No. 9. P. 662–666.
18. Chen J., Wosinska L. Analysis of protection schemes in PON compatible with smooth migration from TDM-PON to hybrid WDM/TDM-PON // OSA J. Optical Net. 2007. Vol. 6. No. 5. P. 514–526.
19. Chen J. Design, Analysis and Simulation of Optical Access and Wide-area Networks Doctoral Dissertation // School of Information and Communication Technology, KTH Royal Institute of Technology. 2009.
20. Lafata P., Vodrazka J. Application of fiber ring for protection of passive optical infrastructure // Radioengineering. 2013. Vol. 22. No. 1. P. 357–362.
21. Imtiaz W.F., Iqbal J., Qamar A., Ali H., and Idrus S.M. Impact of Fiber Duplication on Protection Architectures Feasibility for Passive Optical Networks // Intech, Ch. 17. 2017. P. 340–359.
22. Imtiaz W.A., Khan Y., and Shah W. Cost versus reliability analysis of tree-based hybrid protection architecture for optical code division multiple access system // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 35. No.1. P. 47–53.
23. Nag A., et al. 1:N Protection Design for Minimizing OLTs in Resilient Dual-Homed Long-Reach Passive Optical Network // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking. 2016. Vol. 8. No. 2.
24. Montalvo J., Ruffini M., Payne D. and Wosinska L. Workshops on DISCUS architecture and supporting technologies // Optical Network Design and Modeling: material 18th International Conference. 2014.
25. Wosinska L., Chen J., Larsen C.P. Fiber Access Networks: Reliability Analysis and Swedish Broadband Market [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/220234634> (04.08.2017).
26. Mahloo M. Reliability versus cost in next generation optical access networks. Doctoral Dissertation // School of Information and Communication Technology, KTH Royal Institute of Technology. 2013.
27. Игнатов А.В. Оптимизация сети доступа LONG-REACH PASSIVE OPTICAL NETWORKS // Вестник ИРГТУ. 2016. № 4. С. 89–96. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-89-96

References

1. Kavian Y.S., Leeson M.S. Resilient optical network design. Advances in fault-tolerant methodologies. USA: Information Science Reference. 2012, pp. 228–250.
2. Farjady F. et al. First WP2 Progress Report. Available at: <http://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/7/318137/080/deliverables/001-DISCUSD22Final.pdf> (07 October 2017).
3. Ignatov A.V., Shuvalov V.P. The reliability of subscriber access networks LR-PON. *T-Comm: Telekomunikatsii i transport* [T-Comm]. 2015, vol. 9, no. 5, pp. 25–30. (In Russian)
4. Gromov Yu.Yu., Ivanova O.G., Mosyagina N.G., Nabatov K.A. *Nadezhnost' informatsionnykh sistem* [Reliability of information systems]. Tambov: TGTU Publ., 2010, 160 p. (In Russian)
5. Shuvalov V.P., Timchenko S.V. *Metody rezervirovaniya i vosstanovleniya v tele-kommunikatsionnykh setyakh* [Redundancy and recovery methods in telecommunication networks]. *Nadezhnost' funktsionirovaniya i problemy informatsionnoi bezopasnosti tele-*
- kommunikatsionnykh sistem zheleznodorozhnogo transporta: mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov* [Operation reliability and information security problems of telecommunication systems of railway transport: inter-university thematic collection of scientific articles]. Omsk: OmGUPS Publ., 2009, pp. 40–44. (In Russian)
6. Egunov M.M., Shuvalov V.P. Structural reliability analysis of transport network. *Vestnik SibGUTI* [Proceedings of Siberian State University of Telecommunications and Information Science]. 2012, no. 1, pp. 54–60. (In Russian)
7. Egunov M.M., Shuvalov V.P. Reservation and restoration in telecommunication networks. *Vestnik SibGUTI* [Proceedings of Siberian State University of Telecommunications and Information Science]. 2012, no. 2, pp. 3–10. (In Russian)
8. Chen J., Wosinska L. Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures. IEEE Communications Magazine. 2010, vol. 48, no. 2, pp. 56–65.



9. Machuca C.M., Chen J., Wosinska L. Cost-efficient protection in TDM PONs. *IEEE Communications Magazine*. 2012, vol. 50, no. 8, pp. 110–117.
10. ITU-Y Rec. G983.1. Broadband Optical Access Systems Based on Optical Network (PON). 1998.
11. Kantor M., Chen J., Wosinska L., Wajda K. Techno-economic analysis of PON protection schemes *Proc. IEEE Broadband Europe*, Antwerp, Belgium. 2007.
12. G.983.5(O1/2002). A broadband optical access system with enhanced Survivability. ITU-T Recommendation G.983.5.
13. Shuvalov V.P., Egunov M.M., Minina E.A. *Obespechenie pokazatelei nadezhnosti telekommunikatsionnykh sistem i setei* [Ensuring reliability indicators of telecommunication systems and networks]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2015. 168 p. (In Russian)
14. Rec ITU-T G.989.1(2013)/Amd.1(08/2015) 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements.
15. Dixit A., Mahloo M., Lannoo B., Chen J., Wosinska L., Colle D., and Pickavet M. Protection strategies for next generation passive optical networks-2. *Optical Network Design and Modeling: material International Conference*. 2014, pp. 13–18.
16. OASE Project, D4.2.1: Technical assessment and comparison of next generation optical access system concepts. 2011.
17. Chen J., Chen B., He S. Self-Protection Scheme Against Failures of Distributed Fiber Links in an Ethernet Passive Optical Network. *OSA J. Optical Net*. 2006, vol. 5, no. 9, pp. 662–666.
18. Chen J., Wosinska L. Analysis of protection schemes in PON compatible with smooth migration from TDM-PON to hybrid WDM/TDM-PON. *OSA J. Optical Net*. 2007, vol. 6, no. 5, pp. 514–526.
19. Chen J. Design, Analysis and Simulation of Optical

- Access and Wide-area Networks Doctoral Dissertation. School of Information and Communication Technology, KTH Royal Institute of Technology. 2009.
20. Lafata P., Vodrazka J. Application of fiber ring for protection of passive optical infrastructure. *Radioengineering*. 2013, vol. 22, no. 1, pp. 357–362.
 21. Imtiaz W.F., Iqbal J., Qamar A., Ali H., and Idrus S.M. Impact of Fiber Duplication on Protection Architectures Feasibility for Passive Optical Networks. *Intech*, Ch. 17, 2017, pp. 340–359.
 22. Imtiaz W.A., Khan Y., and Shah W. Cost versus reliability analysis of tree-based hybrid protection architecture for optical code division multiple access system. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016, vol. 35, no.1, pp. 47–53.
 23. Nag A., et al. 1:N Protection Design for Minimizing OLTs in Resilient Dual-Homed Long-Reach Passive Optical Network. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2016, vol. 8, no. 2.
 24. Montalvo J., Ruffini M., Payne D. and Wosinska L. Workshops on DISCUS architecture and supporting technologies. *Optical Network Design and Modeling: material 18th International Conference*. 2014.
 25. Wosinska L., Chen J., Larsen C.P. Fiber Access Networks: Reliability Analysis and Swedish Broadband Market. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/220234634> (accessed 04 August 2017).
 26. Mahloo M. Reliability versus cost in next generation optical access networks. Doctoral Dissertation. School of Information and Communication Technology, KTH Royal Institute of Technology. 2013.
 27. Ignatov A.V. Long-Reach Passive Optical Networks Optimization. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 4, pp. 89–96. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-89-96

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 28.11.2017 г.

The article was received 28 November 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.233.5

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-89-99>

МЕТОД ГЕНЕРИРОВАНИЯ ДВУМЕРНОГО БИНАРНОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА

© А.В. Петров¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Целью исследования является нахождение новых и модернизация известных методов генерирования случайных процессов с заданными статическими (закон распределения вероятностей) и динамическими (корреляционная функция) вероятностными свойствами. **МЕТОДЫ.** Основными методами исследования являются методы теории вероятностей, математической статистики и численные методы. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Объектом исследования является перестановочная технология генерирования случайных процессов с одновременно задаваемыми законом распределения вероятностей и автокорреляционной функцией. Данная технология проста в программной реализации, обладает высоким быстродействием и позволяет вводить требуемые вероятностные свойства с точностью их отражения, достаточной для инженерного применения (например, в имитационном моделировании). В качестве закона распределения вероятностей генерируемого процесса принят бернуллиевский (бинарный) закон. Проведенный анализ вероятностных свойств поведения компонентов перестановочной процедуры позволил выявить новые, ранее неизвестные функциональные возможности данного метода генерирования случайных процессов. Систематизированы вероятностные свойства (законы распределения вероятностей и автокорреляционные функции компонентов вектора претендентов) в зависимости от математически обоснованного варианта перестановки. Исследованы два варианта перестановочного метода, позволяющие генерировать периодически коррелированный бинарный процесс, и обосновано, что эти варианты одновременно обеспечивают возможность генерирования двумерного бинарного случайного процесса. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведение теоретических исследований позволило расширить функциональные возможности перестановочной процедуры генерирования бинарного случайного процесса за счет возможности генерирования двумерного случайного бинарного процесса.

Ключевые слова: теория вероятностей, случайные процессы, генерирование, закон распределения вероятностей, автокорреляционная зависимость, перестановочная технология.

Формат цитирования: Петров А.В. Метод генерирования двумерного бинарного случайного процесса // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 89–99. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-89-99

METHOD OF TWO-DIMENSIONAL BINARY RANDOM PROCESS GENERATION

© A.V. Petrov

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the study is search for new and modernization of known generation methods of random processes with specified static (probability distribution law) and dynamic (correlation function) probabilistic properties. **METHODS.** The main research methods used in the study are the probability theory, mathematical statistics and numerical methods. **RESULTS.** The object of the study is a permutational technology of random process generation with a simultaneously specified probability distribution law and an autocorrelation function. This technology is simple in software implementation, has high response speed and allows to introduce the required probability properties with the accuracy of their reflection, sufficient for engineering applications (e.g. in simulation modeling). The Bernoulli (binary) law is taken as a law of probability distribution of the generated process. The conducted analysis of the probabilistic properties of the behavior of the permutation procedure components has resulted in the identification of new, previously unknown functional capabilities of this method of random process generation. Probabilistic properties (probability distribution laws and autocorrelation functions of the candidate vector components) are systematized depending on a mathematically justified permutation variant. The study is given to two variants of the permutational method that allows to generate a periodically correlated binary process. It is proved that these variants simultaneously provide the possibility to generate a two-dimensional binary random process. **CONCLUSION.** Conducted theoretical studies allowed to expand the functionalities

¹Петров Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем, e-mail: petrov@istu.edu
Alexander V. Petrov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Automated Systems, e-mail: petrov@istu.edu



of the permutational procedure of binary random process generation due to the possibility to generate a two-dimensional random binary process.

Keywords: probability theory, random processes, generation, law of probability distribution, autocorrelation dependence, permutation technology

For citation: Petrov A.V. Method of two-dimensional binary random process generation. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 89–99. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-89-99

Введение

Закон распределения вероятностей (ЗРВ) является наиболее важной, обобщающей все свойства характеристикой в теории вероятности. Выражая математически (например, функцию распределения вероятностей ЗРВ), можно почти всегда вычислить функциональные числовые характеристики, отражающие те или иные вероятностные свойства. Здесь следует оговориться, что существуют формальные математические описания (например, начальные и центральные моменты более 4 порядка), которые не отражают какие-либо вероятностные свойства. В этом случае недостаточно объема знаний для понимания и объяснения такого рода взаимосвязи «вероятностной характеристики» – конкретного свойства случайного явления.

Количество законов распределения вероятностей не ограничено, и всегда можно создать формулу, которая удовлетворяет свойствам, допустим, плотности распределения вероятностей. Но, если за этим нет реально существующего вероятностного явления, то это не плотность распределения вероятностей, а просто формула.

Имеет место традиционное разделение ЗРВ на дискретные и непрерывные. Именно так и описываются законы распределения в справочной и учебной литературе [1–4].

Но возможны и другие признаки классификации.

Ниже рассматривается самый простой и, в то же время, самый вероятностный закон распределения – бернуллиевский (или бинарный). Теория вероятностей изучает случайные явления. Они могут появиться с различной вероятностью, что и порождает закон распределения вероятностей. Но, если смотреть не на числовое или какое-либо иное отражение случайности, а на сам факт появления или не появления случайности, то бернуллиевский ЗРВ как раз и описывает такой наиболее простой вероятностный объект. Итак, случайная величина X распределена по бернуллиевскому закону распределения вероятностей, если она принимает одно из двух возможных значений с вероятностью p и другое, противоположное значение с вероятностью q , равной $1-p$.

Основу этого случайного явления составляет так называемая первая схема независимых испытаний [3–4]. Производится одно испытание, в котором случайное событие A происходит с вероятностью p и не происходит с вероятностью q . Факт появления или не появления можно обозначить по-разному (обычно это единица и ноль соответственно). Отсюда и второе название этого ЗРВ – бинарный.

Перестановочная процедура

Очевидно, что существует множество задач, когда исследователю необходимо иметь инструменты, позволяющие воспроизводить последовательность (реализацию) нулей или единиц, отражающих факты появления или не появления случайного явления. Если речь идет о независимой реализации бинарной случайной величины, то задача генерирования такой реализации достаточно проста. В этом случае от источника первичной случайности [5] (таблицы случайных цифр, датчики случайных чисел) или с помощью методов воспроизведения псевдослучайных чисел извлекаются некоррелированные, равномерно распределенные в интервале от 0 до 1 числа u , и, если каждая из них меньше вероятности p , то тогда считается, что случайная величина принимает значение 0. В противном случае полученное число не меньше



p (случайная величина X), оно принимает значение 1.

Если же необходимо генерировать коррелированную реализацию случайной бинарной величины X , то задача существенно усложняется.

В [6–12] представлена перестановочная технология генерирования коррелированных реализаций случайной величины с бинарным (бернуллиевским) законом распределения вероятностей. По своей сути это исключительно простая по реализации процедура воспроизведения случайных чисел, имеющих необязательным бинарное, а произвольное распределение и требуемую автокорреляционную функцию (АКФ).

Суть этого способа введения автокорреляционной зависимости основана на использовании одного из двух факторов, определяющих значений корреляционного момента

$$K_{x_t, x_{t+\tau}}(t, \tau) = M(x_t \cdot x_{t+\tau}) - M(x_t) \cdot M(x_{t+\tau}) \quad (1)$$

и коэффициента корреляции

$$r_{x_t, x_{t+\tau}}(\tau) = \frac{R_{x_t, x_{t+\tau}}(t, \tau)}{\sigma(x_t) \cdot \sigma(x_{t+\tau})} = \frac{M(x_t \cdot x_{t+\tau}) - M(x_t) \cdot M(x_{t+\tau})}{\sigma(x_t) \cdot \sigma(x_{t+\tau})}. \quad (2)$$

Обе эти вероятностные характеристики отражают линейную вероятностную взаимосвязь между двумя значениями x_t и $x_{t+\tau}$ реализации случайного процесса $\{X(t), t \in T\}$, $T = \{0, 1, \dots\}$. На результат их вычисления и, следовательно, на форму и вид корреляционной зависимости оказывают влияния два фактора – как таковые значения x_t и $x_{t+\tau}$ реализации случайного процесса и их расположение относительно друг друга (величина τ).

Попытки создания метода генерирования реализаций случайных процессов с одновременно заданными законом распределения вероятностей и автокорреляционной функцией, основанного на изменении самого значения, не привели к какому-либо приемлемому результату, так как требовалась существенная аналитическая работа, которая не всегда могла быть успешно осуществлена. Причина в том, что, изменяя значения случайного процесса $\{X(t), t \in T\}$, исследователь автоматически изменяет и ЗРВ и АКФ. Поэтому в данном случае необходимо так подобрать один или несколько последовательно осуществляемых пересчетов значений x_t , чтобы получить требуемый результат – одновременно заданные ЗРВ и АКФ.

Перестановочные технологии заключаются в изменении порядка следования значений случайного процесса $\{X(t), t \in T\}$ без воздействия на их величину^{2,3} [5]. Это приводит к воспроизведению требуемого ЗРВ, для чего достаточно воспользоваться методами генерирования некоррелированных реализаций случайных процессов с заданным ЗРВ. А вот соответствующим образом подобранное правило перестановки обеспечит введение заданной по форме и величине АКФ [5]. Конечно, это не аналитически точно воспроизводящий значения

²Кузнецов Б.Ф. Модели и методы анализа погрешностей измерительных систем при оценке эффективности АСУТП в нефтехимической промышленности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. Иркутск, 2009. 350 с. / Kuznetsov B.F. Models and methods for measurement system error analysis when evaluating automated process control system efficiency in petrochemical industry: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.13.06. Irkutsk, 2009, 350 p.

³Бучнев О.С. Перестановочные методы генерирования случайных процессов с требуемыми статистическими свойствами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Иркутск, 2010. 155 с. / Buchnev O.S. Permutational generation methods of random processes with required statistical properties: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.13.18. Irkutsk, 2010, 155 p.



АКФ метод, но воспроизводить форму и близкие к заданным значения АКФ он позволяет. А простота его программной реализации обеспечивает высокое быстродействие и технологичность применения при выборе численных методов (имитационного моделирования) как инструмента изучения систем различной природы и назначения.

В [6–13] рассматривается простейший вариант такой перестановочной процедуры генерирования бинарно распределенных чисел при размерности вектора претендентов, равной двум. В этом случае показано, что возможно только 16 способов математически обоснованных перестановок, хотя при программной интерпретации перестановочных алгоритмов может быть предложено значительно больше. Это обуславливает необходимость разработки методики, которая установила бы соответствие между формально описанными вариантами перестановок и возможными способами их алгоритмической и программной реализации.

В табл. 1 и 2 приведены законы распределения вероятностей и автокорреляционной функции компонентов u_1 и u_2 двумерных векторов претендентов. В данной статье особое внимание уделено двум вариантам (8 и 13), результат исследования которых изложен ниже.

В табл. 1 и 2 использованы следующие обозначения:

$$p = P\{X = 1\},$$

$$x = \sqrt{2 \cdot p \cdot (1 - p)},$$

$$y = \sqrt{p \cdot (1 - p)},$$

$$z = \sqrt{\frac{p}{1 - p}},$$

$$\binom{n}{m} \text{ – биномиальный коэффициент,}$$

$$T_n(\cdot) \text{ – полином Чебышева 1-го порядка,}$$

$$U_n(\cdot) \text{ – полином Чебышева 2-го порядка,}$$

$$[\cdot] \text{ – целая часть числа,}$$

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{если } t \text{ - четное,} \\ 1, & \text{если } t \text{ - нечетное,} \end{cases}$$

$$\alpha' = \begin{cases} 1, & \text{если } t \text{ - четное,} \\ 0, & \text{если } t \text{ - нечетное,} \end{cases}$$

$$P_0(-;1) = p,$$

$$P_1(-;1) = p \cdot (1 - p \cdot (1 - p)).$$



Таблица 1

Законы распределения вероятностей

Table 1

Laws of probability distribution

Вариант / Variant	Компонент $u_1, t \rightarrow \infty$ / Component $u_1, t \rightarrow \infty$	Компонент u_2 / Component u_2
1	1	$p - p \cdot (1-p)^t \Big _{t \rightarrow \infty} = p$
2	1	$p + p \cdot (1-p)^t \Big _{t \rightarrow \infty} = p$
3	0,5	$p \cdot \left\{ 1 - (1-p) \cdot (1-2 \cdot p) \cdot (x)^{2t-2} \cdot U_{t-1} \left(\frac{1}{2 \cdot x} \right) \right\}$ $p \cdot \left\{ 1 - (1-p) \cdot (1-2 \cdot p) \cdot (x)^{2t-2} \cdot U_{t-1} \left(\frac{1}{2 \cdot x} \right) \right\} \Big _{t \rightarrow \infty} = p$
4	p	p
5	p	p
6	p	p
7	p	p
8	$\frac{p^2}{1-2pq}$	$p \cdot (1-p) + p^2 \cdot \left\{ \sum_{j=0}^{j=\frac{t-2-\alpha}{2}} x^{2j} - \sum_{j=0}^{j=\frac{t-3-\alpha'}{2}} x^{2j} \right\} +$ $+ p \cdot x^t \cdot \left\{ x^\alpha \cdot (1-\alpha \cdot (1-p) \cdot (1-2 \cdot p)) \right\} -$ $- x^{2-\alpha'} \cdot \left\{ x^\alpha \cdot (1-\alpha' \cdot (1-p) \cdot (1-2 \cdot p)) \right\} \Big _{t \rightarrow \infty} = p$
9	$\frac{1}{2-p}$	$p - p \cdot (1-p)^{t+1} \cdot (z)^{t-1} \cdot U_{t-1} \left(\frac{1}{2 \cdot z} \right) \Big _{t \rightarrow \infty} = p$
10	$\frac{p^3}{1-pq}$	$p + \frac{p^2 \cdot y^{-\alpha}}{1-y^2} \cdot (y^{-\alpha} - y^{-\alpha'-1}) +$ $+ y^{-\alpha'} \cdot (y^{-\alpha'} \cdot P_{\alpha'}(-;1) - y^{-\alpha} \cdot P_{\alpha}(-;1)) \Big _{t \rightarrow \infty} = p$
11	0	$p \cdot \left\{ 1 + (1-p)^2 \cdot p^{\left[\frac{t+3}{2} \right]} \cdot \left[1 + (1-p) \cdot p^\alpha \cdot \right. \right.$ $\left. \cdot \sum_{j=0}^{j=\left[\frac{t+2}{3} \right]} (-1)^j \cdot \binom{t-j+2}{j} \cdot p^{\left[\frac{j+1}{2} \right]} \cdot (1-p)^j \right\} \Big _{t \rightarrow \infty} = p$



12	$\frac{p}{1+p}$	$p \cdot \left\{ 1 + (-1)^\alpha \cdot (p)^{t+\alpha+1} \cdot z^{-(t+\alpha+1)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot (1-\alpha)\right) + (t+\alpha-1) \cdot \arcsin\left(\frac{1}{2 \cdot z-1}\right)}{\cos\left(\arcsin\left(\frac{1}{2 \cdot z-1}\right)\right)} \right\} \Bigg _{t \rightarrow \infty} = p$
13	$\frac{p}{1-pq}$	$p \cdot \left\{ 1 + \frac{y^{t-2}}{1-y^2} \cdot (y^{-\alpha} - y^{-\alpha'-1}) + y^{t-2} \cdot (y^{-\alpha'-1} \cdot P_{\alpha'}(-;1) - y^{-\alpha} \cdot P_{\alpha}(-;1)) \right\} \Bigg _{t \rightarrow \infty} = p$
14	0	$p \cdot \left\{ 1 + (y)^{t+1} \cdot U_{t-1}\left(\frac{1}{2 \cdot y}\right) \right\} \Bigg _{t \rightarrow \infty} = p$
15	$\frac{p^2}{1-pq}$	$p + \frac{p^2 \cdot y^{-\alpha}}{1-y^2} \cdot (y^{-\alpha} - y^{-\alpha'-1}) + y^{-\alpha'} \cdot (y^{-\alpha'} \cdot P_{\alpha'}(-;1) - y^{-\alpha} \cdot P_{\alpha}(-;1)) \Bigg _{t \rightarrow \infty} = p$
16	1	$p \cdot \left\{ 1 + (1-p)^2 \cdot (y)^{t-1} \cdot U_{t-1}\left(\frac{1}{2 \cdot y}\right) \right\} \Bigg _{t \rightarrow \infty} = p$

Таблица 2

Автокорреляционные функции

Table 2

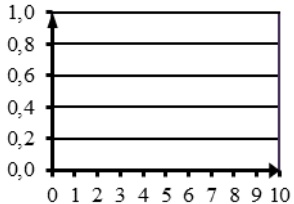
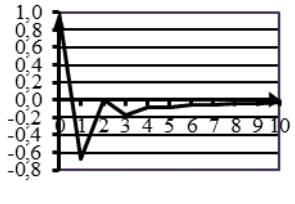
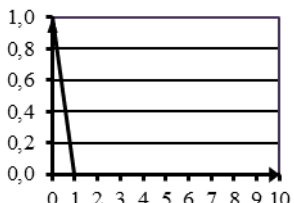
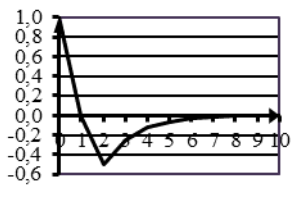
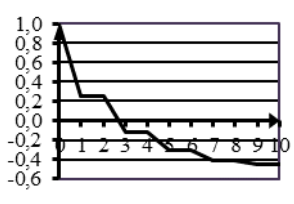
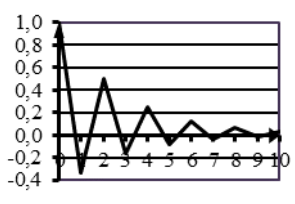
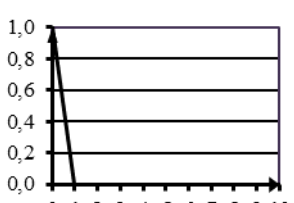
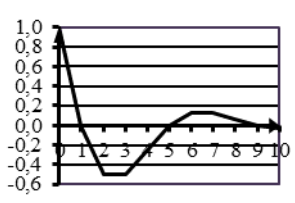
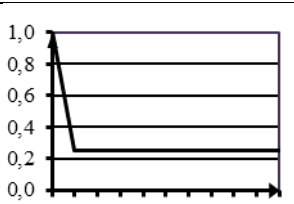
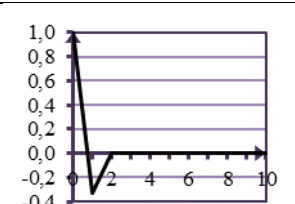
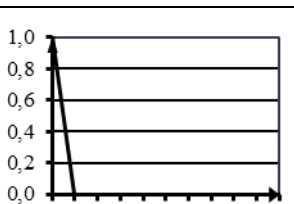
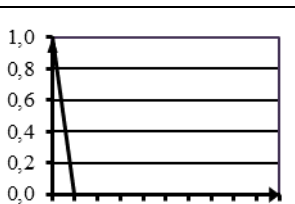
Autocorrelation functions

Вариант / Variant	Компонент u_1 / Component u_1	Компонент $u_2, \tau > 0$ / Component $u_2, \tau > 0$	
1			0
2			0



3			$-p \cdot (1-p) \cdot (x)^{\tau-3} \cdot U_{\tau-3}\left(\frac{1}{2 \cdot x}\right)$
4			0
5			0
6			0
7			0
8			$(-1)^{\tau} \cdot \frac{(x)^{\tau+1}}{2 \cdot (1-x^2)}$
8			$(-1)^{\tau} \cdot \frac{(x)^{\tau+1}}{2 \cdot (1-x^2)}$
9			$-\frac{p^{\tau} \cdot z^{-(\tau-1)}}{2-p} \cdot \left[z \cdot U_{\tau-2}\left(\frac{1}{2 \cdot z}\right) + U_{\tau-3}\left(\frac{1}{2 \cdot z}\right) \right]$



10			0
11			0
13			$(-1)^{\tau} \cdot \frac{(y)^{2(\tau-1)}}{1-y^2}$
14			0
15			$(-1)^{\tau} \cdot \frac{(y)^{\tau-1}}{1-y^2}$
16			0

Периодически коррелированные случайные процессы

В соответствии с публикациями [14–16], случайная последовательность $x_n, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ называется периодически коррелированной, если $M|x_n|^2 < \infty$ для всех n и существует целое T такое, что при любых n и τ

$$Mx_n = Mx_{n+T}; \quad (3)$$

$$Mx_n \cdot x_{n+T} = Mx_{n+T} \cdot x_{n+T+T}. \quad (4)$$

Число T в этом случае называется *периодом последовательности* x_n .



Следует отметить, что периодически коррелированные процессы применяются при исследовании случайных явлений в гидродинамике [17] при прогнозировании временных рядов [18] и в других областях.

Равенство автокорреляционных моментов (см. варианты 8 и 13 табл. 2) компонента u_1 при $T = 1,2$ свидетельствует о том, что выполняется условие (4) и данная АКФ является отражением динамических свойств периодически коррелированных с периодом $T = 2$ случайных процессов. На основании теоремы 1 из [14] следует, что в этом случае мы имеем дело с T -мерной стационарной случайной последовательностью.

В табл. 3 приведен двумерный закон распределения вероятностей бинарного случайного процесса, генерируемого с помощью перестановочной процедуры (вариант 15 табл. 3), а в табл. 4 представлен тот же ЗРВ в финальной форме.

Таблица 3

Двумерный ЗРВ бинарного случайного процесса (вариант 15)

Table 3

Two-dimensional probability distribution law of a binary random process (variant 15)

$u_1 \backslash u_2$	0	1
0	$q \cdot P_t(-; 0)$	$p \cdot P_t(-; 1)$
1	$q \cdot P_t(-; 0)$	$p \cdot P_t(-; 1)$

Таблица 4

Финальный двумерный ЗРВ бинарного случайного процесса (вариант 15)

Table 4

Final two-dimensional probability distribution law of a binary random process (variant 15)

$u_1 \backslash u_2$	0	1
0	$q \cdot P_{\infty}(-; 0) = \frac{q^2}{1 - pq}$	$p \cdot P_{\infty}(-; 1) = \frac{qp^2}{1 - pq}$
1	$q \cdot P_{\infty}(-; 0) = \frac{q^2}{1 - pq}$	$p \cdot P_{\infty}(-; 1) = \frac{qp^2}{1 - pq}$

Выводы

Таким образом, перестановочная процедура генерирования бинарного случайного процесса с двумерным вектором претендентов обеспечивает воспроизведение бинарного процесса с ранее исследованными в [6] свойствами. В этом случае генерируемый процесс сохраняет закон распределения исходного случайного процесса для второго компонента. Первый же компонент генерируется в зависимости от варианта перестановок и основном отличный от бинарного закона распределения вероятностей. Но полученные при этом аналитические выражения вероятности появления единицы в этом новом законе распределения выражены через вероятности единицы исходного бинарного процесса. Последнее обеспечивает возможность обратного пересчета с целью получения на выходе перестановочной процедуры требуемого бинарного закона распределения первого компонента вектора прецедентов. При этом автокорреляционные функции обоих компонентов весьма разнообразны: дельтаобразные, гладкие и знакопеременные экспоненциально-косинусные, экспоненциальные и иные, весьма экзотические для некоторых вариантов перестановок. Важно, что для первого компонента вектора претендентов в двух случаях генерируется периодически-коррелированный



процесс, который является одновременно двумерным случайным процессом, что демонстрирует потенциальные возможности перестановочных технологий генерирования случайных процессов с одновременно заданным законом распределения вероятностей и автокорреляционной зависимостью.

Библиографический список

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1981. 721 с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
3. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения; в 2 т.; пер. с англ. М.: Наука, 1984. 1280 с.
4. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. 8-е изд., испр. и доп. М.: Едиториал УРСС, 2005. 448 с.
5. Петров А.В. Моделирование процессов и систем. СПб.: Лань, 2015. 288 с.
6. Петров А.В. Основы теории полиномиальных стохастических взаимосвязей. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 170 с.
7. Петров А.В. О подходах к вероятностному анализу перестановочных процедур генерирования случайных процессов // Вестник ИргТУ. 2016. № 2 (109). С. 29–38.
8. Петров А.В. Моментные функции бинарного процесса // Вестник ИргТУ. 2016. Т. 20. № 9. С. 65–73. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-9-65-73
9. Петров А.В. Новые функциональные возможности перестановочной процедуры генерирования бинарного случайного процесса // Вестник ИргТУ. 2016. Т. 20. № 10. С. 119–127. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-119-127
10. А. с. № 2017610908. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация. Расчет вероятностей компонентов перестановочной процедуры / А.В. Петров; правообладатель: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»; заявл. 20.09.2016; опубл. 18.01.2017.
11. Петров А.В. К вопросу анализа вероятностных свойств компонентов бинарной перестановочной процедуры // Вестник ИргТУ. 2016. Т. 20. № 11. С. 102–109. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-102-109
12. Петров А.В. О систематизации вероятностных свойств компонентов бинарной перестановочной процедуры // Вестник ИргТУ. 2016. Т. 20. № 12. С. 119–128. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-119-128
13. Polge A.J., Holliday E.M., Bhagavan B.K. Generation of a pseudo-random set with desired correlation and probability distribution. Simulation, 1973. No. 5. P. 138–158.
14. Гладышев Е.Г. О периодически коррелированных случайных последовательностях // Доклады АН СССР. 1961. Т. 137. № 5.
15. Яворский И.Н., Юзефович Р.М., Кравец И.Б., Мацько И.Й. Свойства оценок характеристик периодически коррелированных случайных процессов при предварительном определении периода коррелированности // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника, 2012. Т. 55. № 8. С. 3–14.
16. By Keh-Shin Lii, Murray Rosenblatt M. Estimation for almost periodic processes // The Annals of Statistics 2006. Vol. 34. No. 3. P. 1115–1139.
17. Рожков В.А. Статистическая гидрометеорология. Часть 1. Термодинамика. СПб: ИД Санкт-Петербургского государственного университета, 2013. 188 с.
18. Игнатов Н.А. Прогнозирование временных рядов с регулярными циклическими компонентами с помощью модели периодически коррелированных случайных процессов // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2011. Т. 9. С. 461–477.

References

1. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i studentov vysshikh uchebnykh zavedeni* [A handbook on mathematics for engineers and university students]. Moscow: Nauka Publ., 1981, 720 p. (In Russian)
2. Korn G., Korn T.M. *Spravochnik po matematike dlya uchenykh i inzhenerov* [A handbook on mathematics for scientists and engineers]. Moscow: Nauka Publ., 1974, 832 p. (In Russian)
3. Feller W. Introduction to the theory of probability and its applications, 1984, 1280 p. (Russ. ed.: Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i ee prilozheniya. Moscow, Nauka Publ., 1984, 1280 p.) (In Russian)
4. Gnedenko B.V. *Kurs teorii veroyatnosti* [Course of the theory of probability]. Moscow: Editorial URSS Publ., 2001, 318 p. (In Russian)
5. Petrov A.V. *Modelirovaniye protsessov i sistem* [Modeling of processes and systems]. St. Petersburg: Lan Publ., 2015, 288 p. (In Russian)
6. Petrov A.V. *Osnovy teorii polinomial'nykh stokhasticheskikh vzaimosvyazei* [Fundamentals of the theory of polynomial stochastic relationships]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016, 170 p.
7. Petrov A.V. On approaches to the probabilistic analysis of permutable procedures of random process generation. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 2 (109), pp. 29–38. (In Russian)
8. Petrov A.V. Momentary functions of a binary process. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 9, pp. 65–73. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-9-65-73



- ty]. 2016, vol. 20, no. 9, pp. 65–73. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-9-65-73
9. Petrov A.V. New functionalities of the permutation procedure for binary random process generation. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, vol. 20, no. 10, pp. 119–127. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-119-127
10. Petrov A.V. *Vychisleniye veroyatnostey komponentov protsedury perestанovok* [Probability calculation of permutation procedure components]. Certificate of authorship, no. 2017610908, 2017.
11. Petrov A.V. On the analysis of probabilistic properties of binary permutation procedure components *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, vol. 20, no. 11, pp. 102–109. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-102-109
12. Petrov A.V. On systematization of the probabilistic properties of binary permutation procedure components. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, vol. 20, no. 12, pp. 119–128. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-119-128
13. Polge A.J., Holliday E.M., Bhagavan B.K. Generation of a pseudo-random set with desired correlation and probability distribution. *Simulation*, 1973, no. 5, p. 138–158.
14. Gladyshev E.G. On periodically correlated random sequences. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]. 1961, vol. 137, no. 5. (In Russian)
15. Yavorsky I.N., Yuzefovich R.M., Kravets I.B., Matsko I.I. Properties of estimators of periodically correlated random process characteristics under preliminary determination of the correlation period. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radioelectronics* [Radioelectronics and Communications Systems]. 2012, vol. 55, no. 8, pp. 3–14. (In Russian)
16. By Keh-Shin Lii, Murray Rosenblatt M. Estimation for almost periodic processes. *The Annals of Statistics* 2006, vol. 34, no. 3, pp. 1115–1139.
17. Rozhkov V.A. *Statisticheskaya gidrometeorologiya. Chast' 1. Termodinamika* [Statistical hydrometeorology. Part 1. Thermodynamics]. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ., 2013, 188 p. (In Russian)
18. Ignatov N.A. Prediction of time series with regular cyclic components using the model of periodically correlated random processes. *Nauchnyye trudy: Institut narodnokhozyaystvennogo prognozirovaniya RAN* [Scientific works: Institute of Economic Forecasting RAS]. 2011, vol. 9, pp. 461–477. (In Russian)

Критерии авторства

Петров А.В. полностью подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Petrov A.V. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 15.12.2017 г.
The article was received 15 December 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.23

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-100-117>

ПОЛУЧЕНИЕ РАЗРЕЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ МЕТОДОМ LS SVM ЧЕРЕЗ ПОСТРОЕНИЕ ВЫБОРКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ВНЕШНИХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ

© А.А. Попов¹, Ш.А. Бобоев²

Новосибирский государственный технический университет,

Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Рассматриваются способы получения разреженных решений на основе метода опорных векторов с квадратичной функцией потерь (LS SVM). **МЕТОДЫ.** Выполняется разбиение выборки на обучающую и тестовую части для получения разреженного решения. Приводится последовательный алгоритм получения обучающей и тестовой частей выборки наблюдений с использованием метода *D*-оптимального планирования эксперимента применительно к методу LS SVM. Также приведены последовательные алгоритмы разбиения выборки на части с использованием критерия согласованности. Для проверки работоспособности предлагаемого метода разбиения выборки проведен вычислительный эксперимент. В нем повышение точности решений по LS SVM проводилось посредством подбора масштаба гауссовой ядерной функции. Данный параметр ядерной функции подбирался по минимуму ошибки прогноза на тестовой части выборки. Окончательно точность получаемых решений проверялась по среднеквадратичной ошибке. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Вычислительный эксперимент проводился на модельных данных. В качестве модели, порождающей данные, была выбрана нелинейная зависимость от входного фактора. Дисперсия помехи (уровень шума) определялась в процентах от мощности сигнала. Сравнивались три способа разбиения выборки на обучающую и тестовую: путем замены точек, исключение точек и включение точек в обучающую часть. Для выбора параметров алгоритма LS SVM использовался также критерий перекрестной проверки. **ВЫВОДЫ.** Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что для получения разреженного решения методом LS SVM можно использовать выборку, разделенную на части с использованием *D*-оптимального планирования эксперимента.

Ключевые слова: регрессия, метод LS SVM, квадратичная функция потерь, тестовая выборка, обучающая выборка, оптимальное планирование эксперимента, *D*-оптимальный план, критерий согласованности, критерий скользящего контроля, коэффициент регуляризации, ядерная функция, среднеквадратичная ошибка.

Формат цитирования: Попов А.А., Бобоев Ш.А. Получение разреженных решений методом LS SVM через построение выборки с помощью методов оптимального планирования и внешних критериев качества моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 100–117. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-100-117

OBTAINING SPARSE SOLUTIONS BY LS SVM METHOD THROUGH SAMPLE CONSTRUCTION BY OPTIMAL EXPERIMENT DESIGN METHOD AND MODEL QUALITY CRITERIA

A.A. Popov, Sh.A. Boboev

Novosibirsk State Technical University,

20 K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The paper deals with the methods of obtaining sparse solutions based on the least square support vector machines (LS SVM). **METHODS.** The sample is split into the training and test parts in order to obtain a sparse solution. A sequential algorithm is given to receive the training and test parts of the observation sample using the method of *D*-optimal experiment design as applied to the LS SVM method. We also present the sequential algorithms of sample splitting into parts using the consistency criterion. To testify the operation efficiency of the proposed sample splitting method a computational experiment is conducted where the solution accuracy by LS SVM is improved through adjusting of the scale of the Gaussian kernel function. This parameter of the kernel function is selected by minimizing the prediction error on the sample test part. Finally, the accuracy of the obtained solutions is tested by the mean-square er-

¹Попов Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики, e-mail: a.popov@corp.nstu.ru

Alexander A. Popov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Theoretical and Applied Informatics, e-mail: a.popov@corp.nstu.ru

²Бобоев Шараф Асгорович, аспирант, e-mail: shboboev@mail.ru

Sharaf A. Boboev, Postgraduate Student, e-mail: shboboev@mail.ru



ror. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The computational experiment was performed on simulated data. A nonlinear dependence on the input factor was selected to be a data generating model. The variance of noise (noise level) was determined as the percentage of the signal strength. Three methods of sample splitting into the training and test parts including replacement, rejection and inclusion of points into the training part have been compared. The cross-validation method has been used to select the parameters of the LS SVM algorithm. **CONCLUSIONS.** The results of conducted computational experiments have shown that a sparse solution by the LS-SVM method can be obtained through the use of the sample split into parts using the D -optimal experiment design.

Keywords: regression, LS SVM method, quadratic loss function, test sample, training sample, optimal experiment planning, D -optimal plan, consistency criterion, cross-validation criterion, regularization coefficient, kernel function, mean square error

For citation: Popov A.A., Boboev Sh.A. Obtaining sparse solutions by LS SVM method through sample construction by optimal experiment design method and model quality criteria. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 100–117. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-100-117

Введение

На сегодняшний день метод опорных векторов с квадратичной функцией потерь (LS SVM) является одним из мощных инструментов восстановления регрессионной зависимости. Он является модификацией алгоритма опорных векторов (SVM). Метод SVM впервые был обобщен Вапником для оценивания действительных функций [1]. Позднее Сайкенсом было предложено его расширение с использованием квадратичной функции потерь, которое и получило название LS SVM [2].

Одним из важных этапов построения регрессии с использованием метода LS SVM является настройка ряда его внутренних параметров [3–5]. При использовании произвольных значений параметров алгоритма LS SVM качество получаемых решений может существенно варьироваться. Важнейшей характеристикой тех или иных методов построения регрессионных зависимостей является их способность осуществлять сжатие информации. В случае классических линейных параметрических моделей это достигается тем, что используются экономичные по числу регрессоров модели. В случае непараметрических методов построения регрессии, к коим относится и метод SVM, ситуация иная. В общем случае не удастся существенно сжать информацию, поскольку в модельном описании используется значительная часть обучающей выборки. Это приводит к необходимости хранить в описании модели всю использованную для ее построения выборку. В то же время при использовании классического SVM имеется возможность построения разреженных решений. Разреженное решение характеризуется тем, что в его аддитивном разложении по ядерным функциям задействуются не все точки выборки. Это достигается за счет использования функции потерь ε -нечувствительности Вапника. Именно точки, которые попадают в зону ε -нечувствительности, не участвуют в построении решения.

При использовании метода SVM с квадратичной функцией потерь для получения разреженных решений приходится прибегать к специальным приемам. Например, для их получения можно воспользоваться подходом, предложенным в работе [6]. Основная идея при этом состоит в отбрасывании точек выборки, для которых параметры в аддитивном разложении решения по ядерным функциям имеют малые по модулю значения. Другим подходом в получении разреженных решений может быть разбиение имеющейся выборки на обучающую и тестовую части. При этом обучающая часть и составит выборку, по которой будут вычисляться решения. По отношению к полной выборке эти решения будут разреженными. Важно здесь и то, что получаемая тестовая выборка может быть использована для вычисления на ней критериев качества решений, по которым можно вести настройку внутренних параметров алгоритма. Эти критерии, связанные с точностью прогноза на тестовой выборке, относятся к классу внешних критериев и широко используются для выбора линейных параметрических моделей оптимальной сложности [7–15]. Разбиение выборки на обучающую и тестовую части мож-



но проводить с использованием методов оптимального планирования эксперимента [16–21].

В данной работе мы рассмотрим возможность получения разреженных решений посредством формирования обучающей части выборки с привлечением методов оптимального планирования эксперимента и использованием одного из известных критериев качества моделей, известного как критерий согласованности [19]. Основная идея, которая используется при построении критерия согласованности, состоит в том, что решения, получаемые при использовании разных частей выборки, не должны сильно различаться.

LS SVM регрессия

Рассмотрим задачу восстановления зависимости по зашумленным данным. Дана обучающая выборка

$$D_n = \{(x_k, y_k) : x_k \in X, y_k \in Y; k = 1, \dots, n\}$$

объема n наблюдений вида:

$$y_k = m(x_k) + e_k, k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где $e_k \in R$ будем считать независимой и одинаково распределенной ошибкой с $E[e_k | x = x_k] = 0$ и $Var[e_k] = \sigma^2 < \infty$; $m(x)$ – неизвестная действительная гладкая функция и $E[y_k | x = x_k] = m(x_k)$. Вместо неизвестной функции $m(x)$ будем использовать ее аппроксимацию в виде $f(x) = \omega^T \varphi(x) + b$. Функционал эмпирического риска использования такой аппроксимации имеет вид:

$$R_{emp}(\omega, b) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left((\omega^T \varphi(x_k) + b) - y_k \right)^2. \quad (2)$$

Задачу нахождения вектора ω и $b \in R$ можно свести к решению следующей задачи оптимизации [2]:

$$\min_{\omega, b, e} J(\omega, e) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} \gamma \sum_{k=1}^n e_k^2 \quad (3)$$

в предположении, что $y_k = \omega^T \varphi(x_k) + b + e_k, k = 1, \dots, n$.

В равенстве (3) параметр регуляризации γ отвечает за сложность модели, которая в данном случае определяется нормой вектора ω . Решение задачи (3) обычно проводят в двойственном пространстве с использованием функционала Лагранжа:

$$L(\omega, b, e, \alpha) = J(\omega, e) - \sum_{k=1}^n \alpha_k (\omega^T \varphi(x_k) + b + e_k - y_k) \quad (4)$$

с лагранжевыми множителями $\alpha_k \in R$.



Условия оптимальности задаются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dL}{d\omega} = 0 \rightarrow \omega = \sum_{k=1}^n \alpha_k \varphi(x_k), k = 1, \dots, n; \\ \frac{dL}{db} = 0 \rightarrow \sum_{k=1}^n \alpha_k = 0, k = 1, \dots, n; \\ \frac{dL}{de_k} = 0 \rightarrow \alpha_k = \gamma e_k, k = 1, \dots, n; \\ \frac{dL}{d\alpha_k} = 0 \rightarrow \omega^T \varphi(x_k) + b + e_k = y_k, k = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (5)$$

После исключения ω и e получаем следующее решение:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1_n^T \\ 1_n & \Omega + \frac{1}{\gamma} I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $y = (y_1, \dots, y_n)^T$, $1_n = (1, \dots, 1)^T$, $\hat{\alpha} = (\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_n)$ и $\Omega_{kl} = \varphi(x_k)^T \varphi(x_l)$ для $k, l = 1, \dots, n$.

Результирующая LS SVM модель имеет вид

$$y_n(x) = \sum_{k=1}^n \alpha_k K(x, x_k) + \hat{b}, \quad (7)$$

где $K(x, x_k)$ – ядро скалярного произведения;

$$\hat{b} = \frac{1_n^T \left(\Omega + \frac{1}{\gamma} I_n \right)^{-1} y}{1_n^T \left(\Omega + \frac{1}{\gamma} I_n \right)^{-1} 1_n}, \quad \alpha = \left(\Omega + \frac{1}{\gamma} I_n \right)^{-1} (y - 1_n \hat{b}). \quad (8)$$

В случае выборок большого размера для получения оценок всех параметров вместо обращения матриц в (8) решают систему уравнений (6). Более подробное описание алгоритма LS SVM приведено в работах [1, 22].

Разреженное решение по методу LS SVM

Предположим, что выборка наблюдений W разбита на две части – A и B . Соответственно n_A – объем обучающей выборки, а n_B – объем тестовой выборки. Тогда для получения разреженного решения переписываем (6) в следующем виде:



$$\begin{bmatrix} 0 & 1_{n_A}^T \\ 1_{n_A} & \Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{\alpha}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_A \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $y_A = (y_1, \dots, y_{n_A})^T$ – точки из обучающей выборки; $1_{n_A} = (1, \dots, 1)^T$, $\hat{\alpha}_A = (\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_{n_A})$ и $\Omega_{kl} = \varphi(x_{Ak})^T \varphi(x_{Al})$ для $k, l = 1, \dots, n_A$.

Результирующая разреженная LS SVM модель имеет вид

$$y(x) = \sum_{k=1}^{n_A} \alpha_k K(x, x_k) + \hat{b}, \quad (10)$$

где $K(x, x_k)$ – ядро скалярного произведения, полученное на основе точек исходной и обучающей выборки;

$$\hat{b} = \frac{1_{n_A}^T \left(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right)^{-1} y_A}{1_{n_A}^T \left(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right)^{-1} 1_{n_A}}, \quad \alpha = \left(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right)^{-1} (y_A - 1_{n_A} \hat{b}). \quad (11)$$

Разбиение выборки на обучающую и тестовую части для метода LS SVM с помощью D-оптимального планирования эксперимента

При рассмотрении точности оценивания модели (1) основное внимание будем уделять точности оценивания параметров α , убирая из рассмотрения параметр b через центрирование отклика по схеме $y^* = y - \hat{b}$, как это сделано в (8).

Обозначим оценки параметров α , полученные на обучающей выборке, как

$$\alpha_A = \left(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right)^{-1} (y_B^*),$$

где $\Omega_A = K(x_i, x_j)$, $i, j = 1, \dots, n_A$.

С учетом этого элементы ядерной матрицы Φ_B для вычисления прогноза в точки тестовой выборки будем обозначать как

$$(\Phi_B)_{ij} = K(z_i, x_j), i = 1, \dots, n_B, j = 1, \dots, n_A.$$

Прогнозные значения по модели, полученной на выборке A , рассчитываются как

$$y_B = \Phi_B \alpha_A + \hat{b}_A.$$

Ковариационная матрица ошибок прогноза на выборку B имеет вид:



$$\text{cov}(y_B) = (\sigma^2 + \text{cov}(\hat{b}_A))\Phi_B(\Omega_A + \frac{1}{\gamma}I_{n_A})^{-2}\Phi_B^T + \text{cov}(\hat{b}_A),$$

где

$$\text{cov}(\hat{b}_A) = \sigma^2 \frac{1_{n_A}^T \left(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right)^{-2} 1_{n_A}}{\left[1_{n_A}^T \left(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right)^{-1} 1_{n_A} \right]^2}.$$

Средняя дисперсия прогноза вычисляется как

$$\bar{\sigma}^2(y_B) = (\sigma^2 + \text{cov}(\hat{b}_A)) \text{tr}(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A})^{-2} \Phi_B^T \Phi_B / n_B + \text{cov}(\hat{b}_A).$$

Минимизацию средней дисперсии $\bar{\sigma}^2(y_B)$ будем проводить опосредованно через минимизацию определителя дисперсионной матрицы оценок параметров α . В нашем случае эта дисперсионная матрица имеет вид:

$$\text{cov}(\alpha_A) = (\sigma^2 + \text{cov}(\hat{b}_A))(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A})^{-2}. \quad (12)$$

Поведение $\text{cov}(\hat{b}_A)$ можно рассмотреть на следующем примере. В качестве ядерной возьмем Гауссову функцию (RBF-ядро). В матрице Ω все диагональные элементы $k(x_i, x_i) = 1$. Недиагональные элементы неотрицательны. Сумма всех элементов матрицы $\left(\Omega + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right)^{-1}$ достигает минимального значения, в том числе тогда, когда ее недиагональные элементы близки к нулю. Это возможно, когда параметр масштаба гауссовой ядерной функции выбран достаточно большим или когда точки выборки расположены на достаточно большом расстоянии друг от друга. Будем считать, что это так, тогда

$$\text{cov}(\hat{b}_A) \cong \sigma^2 \frac{n_A (\gamma / (1 + \gamma))^2}{n_A^2 (\gamma / (1 + \gamma))^2} = \frac{\sigma^2}{n_A}.$$

Именно такой дисперсией обладает оценка параметра b в виде среднего $\tilde{b} = 1^T y / n_A$.

Учитывая, что $\left| (\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A})^{-2} \right| = \left| (\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A})^{-1} \right|^2$ и то, что матрица $(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A})^{-1}$

положительно определена, будем рассматривать минимизацию определителя $\left| (\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A})^{-1} \right|$



или, что намного проще, максимизацию определителя $\left| \left(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right) \right|$.

Для определителя положительно определенной матрицы известно свойство, что он меньше, либо равен произведению ее диагональных элементов. Поскольку все диагональные элементы матрицы $\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A}$ равны $(\gamma + 1) / \gamma$, можно заключить, что максимум определителя достигается при диагональной матрице Ω_A . При этом $\text{cov}(\hat{b}_A) = \frac{\sigma^2}{n_A}$. Таким образом, в целях упрощения задачи минимизации определителя матрицы ковариации (12) будем решать задачу максимизации определителя $\left| \left(\Omega_A + \frac{1}{\gamma} I_{n_A} \right) \right|$. Тем самым мы будем строить дискретный

D -оптимальный план объемом в n_A наблюдений, используя все точки имеющейся выборки. В нашем случае для построения дискретного D -оптимального плана удобно воспользоваться хорошо себя зарекомендовавшими последовательными алгоритмами [19–21]. Обозначим через G_s матрицу размером $s \times s$ для обучающей выборки объемом в s наблюдений и состоящую из элементов $(G_s)_{ij} = K(x_i, x_j) + \frac{1}{\gamma} I_s, i, j = 1, \dots, s$.

Тогда на шаге $s + 1$ матрица G_{s+1} будет иметь вид:

$$G_{s+1} = \begin{pmatrix} G_s & F(x_{s+1}) \\ F^T(x_{s+1}) & K(x_{s+1}, x_{s+1}) + \frac{1}{\gamma} \end{pmatrix},$$

где $F^T(x_{s+1}) = (K(x_1, x_{s+1}), K(x_2, x_{s+1}), \dots, K(x_s, x_{s+1}))$.

Определитель окаймленной матрицы легко вычисляется как

$$|G_{s+1}| = |G_s| * \Delta(x_{s+1}),$$

где $\Delta(x_{s+1}) = [K(x_{s+1}, x_{s+1}) + \frac{1}{\gamma} - F^T(x_{s+1}) G_s^{-1} F(x_{s+1})]$.

Таким образом, очередная точка, включаемая в обучающую выборку, отыскивается по следующей схеме: $x_{s+1} = \underset{x}{\text{Arg max}} \Delta(x)$, где аргумент x принимает значения координат точек исходной выборки, еще не включенных в обучающую часть.

Разбиение выборки на обучающую и тестовую части опирается на матрицу G_s , элементы которой зависят от параметров используемых ядерных функций. Очевидно, что перед проведением процедуры D -оптимального разбиения эти параметры необходимо каким-то образом оценить. Можно пойти по традиционному пути, используя критерий контроля по отдельным объектам. Контроль по отдельным объектам (Leave-One-Out, LOO) является частным случаем полного скользящего контроля. Это самый распространенный вариант скользящего



контроля. В нем каждый объект ровно один раз участвует в контроле, а длина обучающих подвыборок лишь на единицу меньше длины полной выборки. Данный вариант является преимуществом LOO, а его недостатком – большая ресурсоемкость: задачу обучения приходится решать $n-1$ раз, что сопряжено со значительными вычислительными затратами.

Для получения оценки с помощью метода LOO запишем решение системы (6) в виде $X = A^{-1}Y$.

На каждой итерации скользящего контроля i -е наблюдение исходной выборки используется в качестве контрольного, а все остальные составляют обучающую подвыборку. Таким образом, на i -й итерации мы имеем СЛАУ вида

$$A_i X_i = Y.$$

Здесь A_i представляет собой квадратную матрицу, которая имеет тот же ранг, что и A , но все элементы i -го столба в ней заменены нулями, за исключением элемента $A(i,i)$, который остается неизменным. Рассмотрим простой пример, когда исходная выборка состоит из трех наблюдений, а второе наблюдение используется в качестве контрольного. Таким образом:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 1 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 1 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_{11} & 0 & a_{13} \\ 1 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 1 & a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix}.$$

–1

Легко проверить, что $X_i = A_i^{-1} Y$ является решением на i -й итерации. При этом i -й элемент X_i тривиален в силу того, что i -е наблюдение исключается из обучающей выборки.

Нашей целью является получение новых значений $y_{loo}(x_i)$ в обучающей выборке. Для этого решаем следующую СЛАУ:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1_n^T \\ 1_n & A_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix}.$$

Далее вычисляем значение $y_{loo}(x_i)$ по формуле

$$y_{loo}(x) = \sum_{i=1}^k \alpha_i K(x, x_i) + \hat{b}.$$

В самом конце вычисляем значение LOO по формуле



$$LOO = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(y_i - y_{loo}(x_i) \right)^2.$$

Важно также, чтобы получаемое разреженное решение не имело какого-либо смещения. В вычислительном эксперименте удобным критерием контроля точности получаемых решений является среднеквадратичная ошибка MSE:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \hat{y}_i)^2,$$

где $u_i, \hat{y}_i, i=1, \dots, n$ соответственно незашумленное и оцененное по модели значение отклика.

Разбиение выборки на части с использованием критерия согласованности

Предложенный в предыдущем пункте метод получения разреженного решения предполагает использование обучающей выборки, свойства которой обеспечивают получение на ней решения, обеспечивающего наименьшую дисперсию предсказания на тестовой части выборки. Можно пойти по другому пути, формируя обучающую выборку через минимизацию критерия согласованности:

$$V^2 = \left(y(A) - y \right)^T \left(y - y(B) \right) / n,$$

где $y(A) = \Phi \alpha_A + \hat{b}_A$ – прогнозные значения по модели, оцененной на обучающей выборке,

$y(B) = \Phi \alpha_B + \hat{b}_B$ – прогнозные значения по модели, оцененной на тестовой выборке и

$y = \Phi \alpha + \hat{b}$ – прогнозные значения по модели, оцененной по всей выборке.

Критерий согласованности может быть также задействован в рассмотренном выше алгоритме разбиения выборки на обучающую и тестовую части по процедуре D -оптимального планирования эксперимента на заключительном этапе при уточнении внутренних параметров алгоритма LS SVM.

Для разбиения выборки на обучающую и тестовую части с использованием критерия согласованности приведем три алгоритма.

Вариант включения

1. Выполняем предварительное оценивание параметра той или иной ядерной функции с использованием критерия скользящего контроля (LOO).

2. Последовательно, по схеме наращиваем объем обучающей выборки до заданного объема. Каждая новая точка, включаемая в обучающую часть, выбирается по минимуму критерия согласованности V^2 . Периодически или после каждого включения новой точки производим подстройку параметров ядерной функции. Новое значение параметра ядерной функции выбираем в том случае, если при нем удастся получить лучшее значение критерия V^2 .

Вариант исключения

1. Выполняем предварительное оценивание параметра той или иной ядерной функции с использованием критерия LOO.

2. Последовательно, по схеме наращиваем объем тестовой выборки, т.е. исключаем точки из обучающей выборки. Каждая новая точка, включаемая в B , выбирается по минимуму критерия V^2 . Точки, не включенные в B , образуют обучающую выборку. Периодически или после каждого включения новой точки производим подстройку параметров ядерной функции. Новое значение параметра ядерной функции выбираем в том случае, если при нем удастся получить лучшее значение критерия V^2 .



Вариант замены:

1. Выполняем предварительное оценивание параметра той или иной ядерной функции с использованием критерия LOO.

2. Выполняем D -оптимальное разбиение исходной выборки на части A и B с числом наблюдений $n_A + n_B = n$. Выполняем поиск оптимального значения параметров ядерных функций по критерию V^2 .

3. Алгоритм последовательной замены по уточнению состава обучающей выборки A . Точки из выборки A поочередно заменяем точками выборки B . После каждой замены вычисляем критерий согласованности, который будем обозначать как $V^2(\pm)$, а значение критерия до замены как V^2 . Если окажется, что $V^2(\pm) < V^2$, то данную замену оставляем в силе и присваиваем V^2 значение равное $V^2(\pm)$. Если удачных замен нет, то останов. После шага 3 состав точек в обучающей выборке может измениться. Можно попытаться улучшить получаемое разреженное решение, вводя дополнительный шаг.

4. Выполняем поиск оптимального значения параметров ядерных функций по критерию V^2 с использованием обучающей выборки, полученной на шаге 3.

Данный алгоритм позволяет уточнить состав точек обучающей выборки, которая была получена по процедуре D -оптимального планирования эксперимента.

Вычислительный эксперимент

Целью вычислительного эксперимента являлось сравнение полученных разреженных решений с разбиением выборки на тестовую и обучающую части с помощью D -оптимального планирования и критерия согласованности.

Для проведения исследования использовалась тестовая функция: $m(x) = 7 / e^{(x+0.75)^2} + 3x$, заданная на отрезке $[-1; 1]$. В качестве ядерной функции использовалось RBF ядро. В качестве помехи использовались нормально распределенные величины. Уровень помехи (дисперсия случайной величины) выбирался от 5 до 25% от мощности незашумленного сигнала. Количество наблюдений было выбрано 10, 20, 30 и 50. При проведении вычислительных экспериментов параметр регуляризации принимал фиксированное значение, равное 10. Подбор лучшего решения осуществлялось по параметру масштаба RBF ядра, который варьировался от 10^{-5} до 10^0 с шагом 0,1.

Ниже в табл. 1–5 приведены значения среднеквадратичной ошибки (MSE), рассчитанной по полученным решениям на основе того или иного алгоритма извлечения обучающей выборки. В строках «без разбиения» указываются значения MSE для неразреженных решений, полученных на полных выборках. Настройка параметров ядерных функций в этом случае проводилась по критерию LOO. Условия экспериментов по столбцам различались тем, что использовалось разное количество точек в тестовой части в процентном выражении от объема полной выборки.

На рис. 1, 2 приведены графики значений MSE при использовании D -оптимального плана и других вариантов разбиения выборки с использованием критерия согласованности. Можно сравнивать между собой неразреженное решение и наполовину разреженное при 50%-ной тестовой части. Видно, что получаемые разреженные решения при D -оптимальном разбиении выборки лишь немногим проигрывают неразреженным по величине MSE. При этом, если использовать вариант разбиения на основе критерия согласованности, то улучшения качества решения с позиции MSE чаще всего не наблюдается. Это позволяет говорить о том, что для получения разреженного решения можно использовать обучающую выборку, полученную с использованием D -оптимального разбиения ее на части.



Таблица 1

Значение MSE при 5%-ном уровне шума

Table 1

MSE value at 5% noise level

Объем выборки / Sample size	Вариант разбиения / Splitting variant	Количество точек в тестовой части / Number of points in the test part, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N=10	без разбиения / without splitting	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0159	0,0159	0,0228	0,0228	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051
	замена / replacement	0,0159	0,0159	0,3142	0,3142	0,0051	0,0051	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046
	исключение / rejection	0,2031	0,2031	0,3142	0,3142	0,3142	0,3142	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051
	включение / inclusion	0,0159	0,0159	0,0228	0,0228	0,0051	0,0051	0,0046	0,0046	0,0051	0,0051
N=20	без разбиения / without splitting	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0079	0,2050	0,2381	0,2381	0,2381	0,0025	0,0029	0,0029	0,0025	0,0029
	замена / replacement	0,0079	0,0029	0,2381	0,2381	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029
	исключение / rejection	0,2050	0,0029	0,2381	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0025	0,0029
	включение / inclusion	0,0079	0,2050	0,2381	0,2381	0,2381	0,0025	0,0029	0,0029	0,0025	0,0029
N=30	без разбиения / without splitting	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0163	0,2225	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027
	замена / replacement	0,2225	0,2225	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027
	исключение / rejection	0,2225	0,2225	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027
	включение / inclusion	0,0163	0,2225	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027
N=50	без разбиения / without splitting	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011
	D-опт. план / D-optimal plan	0,1973	0,1973	0,0022	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026
	замена / replacement	0,1973	0,1973	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026
	исключение / rejection	0,1973	0,1973	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026
	включение / inclusion	0,1973	0,1973	0,0022	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026



Таблица 2

Значение MSE при 10%-ном уровне шума

Table 2

MSE value at 10% noise level

Объем выборки / Sample size	Вариант разбиения / Splitting variant	Количество точек в тестовой части / Number of points in the test part, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N=10	без разбиения / without splitting	0,0226	0,0226	0,0226	0,0226	0,0226	0,0226	0,0226	0,0226	0,0226	0,0226
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0532	0,0532	0,0532	0,0532	0,3147	0,3147	0,0123	0,0123	0,0123	0,0123
	замена / replacement	0,0532	0,0532	0,3147	0,3147	0,0123	0,0123	0,0118	0,0118	0,0118	0,0118
	исключение / rejection	0,2505	0,2505	0,0118	0,0118	0,0123	0,0123	0,0123	0,0123	0,0123	0,0123
	включение / inclusion	0,0532	0,0532	0,0532	0,0532	0,3147	0,3147	0,0123	0,0123	0,0123	0,0123
N=20	без разбиения / without splitting	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0051	0,0043	0,2381	0,2381	0,0043	0,0039	0,0043	0,0043	0,0039	0,0043
	замена / replacement	0,0143	0,0043	0,2381	0,2381	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043
	исключение / rejection	0,1763	0,2381	0,2381	0,2381	0,0043	0,0039	0,0043	0,0043	0,0039	0,0043
	включение / inclusion	0,0051	0,0043	0,2381	0,2381	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0039	0,0043
N=30	без разбиения / without splitting	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0100	0,2218	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0040
	замена / replacement	0,0044	0,2218	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044
	исключение / rejection	0,0044	0,2218	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0047	0,0047	0,0044	0,0040
	включение / inclusion	0,0100	0,2218	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0047	0,0044	0,0040
N=50	без разбиения / without splitting	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017
	D-опт. план / D-optimal plan	0,1988	0,1988	0,0062	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
	замена / replacement	0,1988	0,1988	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
	исключение / rejection	0,1988	0,1988	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
	включение / inclusion	0,1988	0,1988	0,0062	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067



Таблица 3

Значение MSE при 15%-ном уровне шума

Table 3

MSE value at 15% noise level

Объем выборки / Sample size	Вариант разбиения / Splitting variant	Количество точек в тестовой части / Number of points in the test part, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N=10	без разбиения / without splitting	0,0304	0,0304	0,0304	0,0304	0,0304	0,0304	0,0304	0,0304	0,0304	0,0304
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,3112	0,3112	0,0118	0,0118	0,0118	0,0118
	замена / replacement	0,0614	0,0614	0,3112	0,3112	0,3112	0,3112	0,0118	0,0118	0,0112	0,0112
	исключение / rejection	0,2050	0,2050	0,3112	0,3112	0,3112	0,3112	0,3112	0,3112	0,0118	0,0118
	включение / inclusion	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,3112	0,3112	0,0118	0,0118	0,0118	0,0118
N=20	без разбиения / without splitting	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0091	0,2417	0,2417	0,2417	0,2417	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173	0,0184
	замена / replacement	0,0091	0,2417	0,2417	0,2417	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173	0,0184	0,0184
	исключение / rejection	0,2417	0,2417	0,2417	0,2417	0,0173	0,0184	0,0184	0,0184	0,0184	0,0184
	включение / inclusion	0,0091	0,2417	0,2417	0,2417	0,2417	0,0173	0,0173	0,0173	0,0173	0,0184
N=30	без разбиения / without splitting	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059
	D-опт. план / D-optimal plan	0,2225	0,2225	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
	замена / replacement	0,2225	0,2225	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
	исключение / rejection	0,2225	0,2225	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
	включение / inclusion	0,2225	0,2225	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
N=50	без разбиения / without splitting	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024
	D-опт. план / D-optimal plan	0,1976	0,1976	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0055
	замена / replacement	0,1976	0,1976	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061
	исключение / rejection	0,1976	0,1976	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0055
	включение / inclusion	0,1976	0,1976	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0055



Таблица 4

Значение MSE при 20%-ном уровне шума

Table 4

MSE value at 20% noise level

Объем выборки / Sample size	Вариант разбиения / Splitting variant	Количество точек в тестовой части / Number of points in the test part, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N=10	без разбиения / without splitting	0,0367	0,0367	0,0367	0,0367	0,0367	0,0367	0,0367	0,0367	0,0367	0,0367
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0685	0,0685	0,0685	0,0685	0,3290	0,3290	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250
	замена / replacement	0,0685	0,0685	0,3290	0,3290	0,3290	0,3290	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250
	исключение / rejection	0,2844	0,2844	0,0238	0,0238	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250
	включение / inclusion	0,0685	0,0685	0,0685	0,0685	0,3290	0,3290	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250
N=20	без разбиения / without splitting	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0138	0,0195	0,2375	0,0213	0,0213	0,0213	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220
	замена / replacement	0,0277	0,2375	0,2375	0,2375	0,0213	0,0213	0,0220	0,0220	0,0213	0,0220
	исключение / rejection	0,0277	0,2375	0,2375	0,0213	0,0213	0,0213	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220
	включение / inclusion	0,0138	0,0195	0,2375	0,0213	0,0213	0,0213	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220
N=30	без разбиения / without splitting	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0486	0,2237	0,0135	0,0135	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145
	замена / replacement	0,2237	0,2237	0,0135	0,0135	0,0145	0,0135	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145
	исключение / rejection	0,2237	0,2237	0,0135	0,0135	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145
	включение / inclusion	0,0486	0,2237	0,0135	0,0135	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145
N=50	без разбиения / without splitting	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
	D-опт. план / D-optimal plan	0,1982	0,1982	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139
	замена / replacement	0,1982	0,1982	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139
	исключение / rejection	0,1982	0,1982	0,1982	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139
	включение / inclusion	0,1982	0,1982	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139



Таблица 5

Значение MSE при 25%-ном уровне шума

Table 5

MSE value at 25% noise level

Объем выборки / Sample size	Вариант разбиения / Splitting variant	Количество точек в тестовой части / Number of points in the test part, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N=10	без разбиения / without splitting	0,0221	0,0221	0,0221	0,0221	0,0221	0,0221	0,0221	0,0221	0,0221	0,0221
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0289	0,0289	0,0300	0,0300	0,1594	0,1594	0,3039	0,3039	0,0300	0,0300
	замена / replacement	0,0255	0,0255	0,0300	0,0300	0,3039	0,3039	0,3039	0,3039	0,0300	0,0300
	исключение / rejection	0,2466	0,2466	0,0300	0,0300	0,3039	0,3039	0,3039	0,3039	0,0300	0,0300
	включение / inclusion	0,0289	0,0289	0,0300	0,0300	0,1594	0,1594	0,3039	0,3039	0,0300	0,0300
N=20	без разбиения / without splitting	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133
	D-опт. план / D-optimal plan	0,0207	0,2404	0,2404	0,0262	0,0268	0,0268	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262
	замена / replacement	0,0207	0,2404	0,2404	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0268	0,0262
	исключение / rejection	0,2029	0,2404	0,2404	0,2404	0,0268	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262
	включение / inclusion	0,0207	0,2404	0,2404	0,0262	0,0268	0,0268	0,0262	0,0262	0,0268	0,0262
N=30	без разбиения / without splitting	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033
	D-опт. план / D-optimal plan	0,2241	0,2241	0,0261	0,0271	0,0271	0,0261	0,0271	0,0261	0,0271	0,0271
	замена / replacement	0,2241	0,2241	0,0261	0,0271	0,0261	0,0261	0,0271	0,0261	0,0261	0,0271
	исключение / rejection	0,2241	0,2241	0,0261	0,2241	0,2241	0,0261	0,0271	0,0261	0,0261	0,0271
	включение / inclusion	0,2241	0,2241	0,0261	0,0271	0,0271	0,0261	0,0271	0,0261	0,0271	0,0271
N=50	без разбиения / without splitting	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044
	D-опт. план / D-optimal plan	0,1978	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
	замена / replacement	0,1978	0,1978	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
	исключение / rejection	0,1978	0,0190	0,0190	0,0190	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0190
	включение / inclusion	0,1978	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190

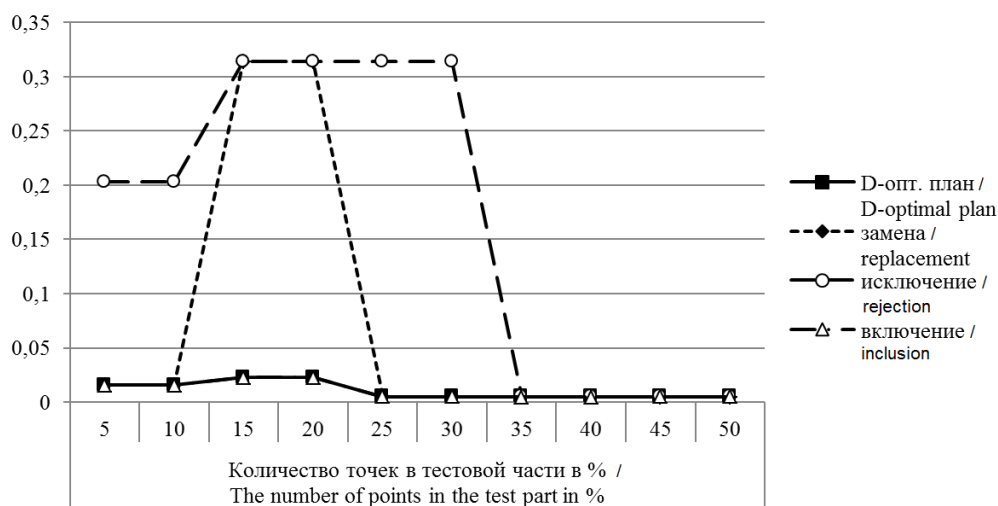


Рис. 1. График значений MSE для выборки объема 10 при 5%-ном уровне шума
Fig. 1. Graph of MSE values for the sample of size 10 with 5% noise level

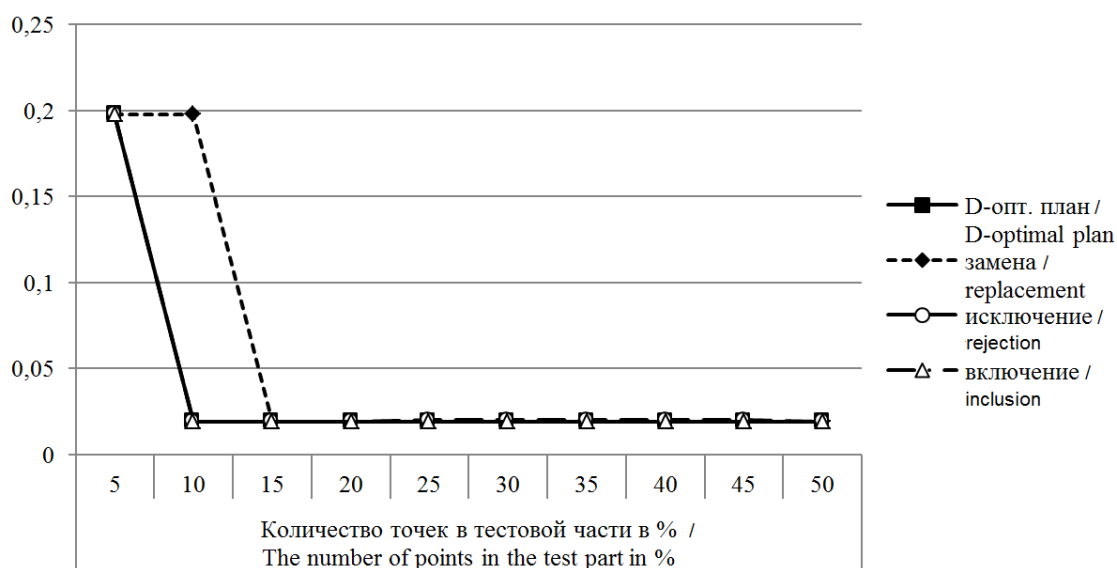


Рис. 2. График значений MSE для выборки объема 50 при 25%-ном уровне шума
Fig. 2. Graph of MSE values for the sample of size 50 with 25% noise level

Заключение

В работе для получения разреженного решения на основе метода LS SVM предложены различные способы разбиения выборки на обучающую и тестовую части с использованием D -оптимального разбиения и критерия согласованности. Для каждого из способов разбиения выборки предложены последовательные алгоритмы.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов для получения разреженных решений можно рекомендовать использовать обучающую выборку, которая в том числе может быть получена по процедуре D -оптимального планирования эксперимента. При этом окончательную настройку внутренних параметров метода LS SVM можно осуществлять, ориентируясь на величину критерия согласованности.



Библиографический список

1. Vapnik V. Statistical Learning Theory. New York: John Wiley, 1998. 736 p.
2. Johan A.K. Suykens, Tony Van Gestel, Jos De Brabanter, Bart De Moor, Joos Vandewalle. Least Square Support Vector Machines. New Jersey-London-Singapore-Hong Kong: World Scientific, 2002. 290 p.
3. Cherkassky V., Ma Y. Practical selection of SVM parameters and noise estimation for SVM regression // Neural Networks. 2004. No. 17. P. 113–126.
4. Попов А.А., Саутин А.С. Определение параметров алгоритма опорных векторов при решении задачи построения регрессии // Сборник научных трудов НГТУ. 2008. № 2 (52). С. 35–40.
5. Popov A.A., Sautin A.S. Selection of support vector machines parameters for regression using nested grids // The third international forum on strategic technology (IFOST 2008): proceedings (Novosibirsk–Tomsk, 23–29 June 2008). Novosibirsk, 2008. P. 329–331.
6. J.A.K. Suykens., J. De Brabanter, L. Lukas, J. Vandewalle. Weighted least squares support vector machines: robustness and sparse approximation // Neurocomputing. 2002. Vol. 48. P. 85–105.
7. Степашко В.С., Кочерга Ю.Л. Методы и критерии решения задач структурной идентификации // Автоматика. 1985. № 5. С. 29–37.
8. Кочерга Ю.Л. J-оптимальная редукция структуры модели в схеме Гаусса – Маркова // Автоматика. 1988. № 4. С. 34–38.
9. Сарычев А.П. Усредненный критерий регулярности метода группового учета аргументов в задаче поиска наилучшей регрессии // Автоматика. 1990. № 5. С. 28–33.
10. Степашко В.С. Асимптотические свойства внешних критериев выбора моделей // Автоматика. 1988. № 6. С. 75–82.
11. Степашко В.С. Потенциальная помехоустойчивость моделирования по комбинаторному алгоритму МГУА без использования информации о помехах // Автоматика. 1983. № 3. С. 18–28.
12. Степашко В.С. Селективные свойства критерия непротиворечивости моделей // Автоматика. 1986. № 2. С. 40–49.
13. Попов А.А. Использование повторных выборок в критериях селекции моделей // Планирование эксперимента, идентификация, анализ и оптимизация многофакторных систем: сб. науч. ст. Новосибирск: Изд-во Новосибирского электротехнического ин-та, 1990. С. 82–88.
14. Лисицин Д.В., Попов А.А. Исследование критериев селекции многооткликовых регрессионных моделей // Сборник научных трудов НГТУ. 1996. Вып. 2. С. 19–28.
15. Лисицин Д.В., Попов А.А. Конструирование критериев селекции многомерных регрессионных моделей // Сборник научных трудов НГТУ. 1996. Вып. 1. С. 13–20.
16. Попов А.А. Планирование эксперимента в задачах разбиения выборки в МГУА // Сборник научных трудов НГТУ. 1995. Вып. 2. С. 35–40.
17. Попов А.А. Разбиение выборки для внешних критериев селекции моделей с использованием методов планирования эксперимента // Заводская лаборатория. 1997. № 1. С. 49–53.
18. Попов А.А., Бобоев Ш.А. Получение тестовой выборки в методе LS SVM с использованием оптимального планирования эксперимента // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 4. С. 80–99. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-80-99
19. Попов А.А. Оптимальное планирование эксперимента в задачах структурной и параметрической идентификации моделей многофакторных систем: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 296 с.
20. Попов А.А. Последовательные схемы построения оптимальных планов эксперимента // Сборник научных трудов НГТУ. 1995. Вып. 1. С. 39–44.
21. Попов А.А. Последовательные схемы синтеза оптимальных планов эксперимента // Доклады академии наук высшей школы России. 2008. № 1 (10). С. 45–55.
22. Попов А.А., Бобоев Ш.А. Построение регрессионных зависимостей с использованием квадратичной функции потерь в методе опорных векторов // Сборник научных трудов НГТУ. 2015. № 3 (81). С. 69–78. DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-69-78

References

1. Vapnik V. Statistical Learning Theory. New York: John Wiley, 1998, 736 p.
2. Johan A.K. Suykens, Tony Van Gestel, Jos De Brabanter, Bart De Moor, Joos Vandewalle. Least Square Support Vector Machines. New Jersey-London-Singapore-Hong Kong: World Scientific, 2002, 290 p.
3. Cherkassky V., Ma Y. Practical Selection of SVM Parameters and Noise Estimation for SVM Regression. Neural Networks. 2004, no. 17, pp. 113–126.
4. Popov A.A., Sautin A.S. Parameters Estimation in Support Vector Regression. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*. [Proceedings of Novosibirsk state technical university]. 2008, no. 2 (52), pp. 35–40. (In Russian)
5. Popov A.A., Sautin A.S. Selection of Support Vector Machines Parameters for Regression Using Nested Grids. The third international forum on strategic technology (IFOST 2008): Proceedings (Novosibirsk–Tomsk, 23–29 June 2008). Novosibirsk, 2008, pp. 329–331.



6. J.A.K. Suykens, J. De Brabanter, L. Lukas, J. Vandewalle. Weighted Least Squares Support Vector Machines: Robustness and Sparse Approximation. *Neurocomputing*. 2002, vol. 48, pp. 85–105.
7. Stepashko V.S., Kocherga Yu.L. Methods and solving criteria for the problems of structural identification. *Avtomatika [Automatics]*. 1985, no. 5, pp. 29–37. (In Russian)
8. Kocherga Yu.L. J-optimal reduction of the model structure in the Gauss – Markov scheme. *Avtomatika [Automatics]*. 1988, no. 4, pp. 34–38. (In Russian)
9. Sarychev A.P. Averaged regularity criterion of group method of accounting arguments in the problem of finding the best regression. *Avtomatika [Automatics]*. 1990, no. 5, pp. 28–33. (In Russian)
10. Stepashko V.S. Asymptotic properties of external model selection criteria. *Avtomatika [Automatics]*. 1988, no. 6, pp. 75–82. (In Russian)
11. Stepashko V.S. Potential noise immunity of combinatorial GMDH algorithm-based modeling without using interference information. *Avtomatika [Automatics]*. 1983, no. 3, pp. 18–28. (In Russian)
12. Stepashko V.S. Selective properties of model consistency criterion. *Avtomatika [Automatics]*. 1986, no. 2, pp. 40–49. (In Russian)
13. Popov A.A. *Ispol'zovanie povtornykh vyborok v kriteriyakh selektsii modelei* [Use of repeated samples in model selection criteria]. *Sbornik nauchnykh statei "Planirovanie eksperimenta, identifikatsiya, analiz i optimizatsiya mnogofaktornykh sistem"* [Collection of scientific articles "Experiment planning, identification, analysis and optimization of multifactor systems"]. Novosibirsk: Novosibirsk Electrotechnical Institute Publ., 1990, pp. 82–88. (In Russian)
14. Lisitsin D.V., Popov A.A. Studying selection criteria of multiresponse regression models. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Proceedings of Novosibirsk state technical university]. 1996, issue 2, pp. 19–28. (In Russian)
15. Lisitsin D.V., Popov A.A. Development of selection criteria for multidimensional regression models. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Proceedings of Novosibirsk state technical university]. 1996, issue 1, pp. 13–20. (In Russian)
16. Popov A.A. Experiment planning in sample splitting problems in GMDH. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Proceedings of Novosibirsk state technical university]. 1995, issue 2, pp. 35–40. (In Russian)
17. Popov A.A. Sample splitting for external criteria of model selection using experiment planning methods. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial Laboratory]. 1997, no. 1, pp. 49–53. (In Russian)
18. Popov A.A., Boboev Sh.A. Obtaining a test sample by the LS–SVM method using optimal experiment planning. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Science Bulletin of NSTU]. 2016, no. 4, pp. 80–99. (In Russian) DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-80-99
19. Popov A.A. *Optimal'noe planirovanie eksperimenta v zadachakh strukturnoi i parametricheskoi identifikatsii modelei mnogofaktornykh sistem* [Optimal experiment planning in the problems of structural and parametric identification of multifactor systems models]. Novosibirsk: NSTU Publ., 2013, 296 p. (In Russian)
20. Popov A.A. The sequential construction schemes of the optimal experiment plans. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk state technical university]. 1995, no.1, pp. 39–44. (In Russian)
21. Popov A.A. Sequential synthesis schemes of optimal experiment plans. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk state technical university]. 2008, no. 1 (10), pp. 45–55. (In Russian)
22. Popov A.A., Boboev Sh.A. The construction of a regression relationships using least square in support vector machines. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk state technical university]. 2015, no. 3 (81), pp. 69–78. (In Russian) DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-69-78

Критерии авторства

Попов А.А., Бобоев Ш.А. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Popov A.A., Boboev Sh.A. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 30.11.2017 г.
The article was received 30 November 2017



Обзорная статья / Review article

УДК 004.8

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-118-133>

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОАГЕНТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ В ТЕХНОСФЕРЕ

© А.В. Смирнов¹, Р.Ш. Хабибулин², Д.В. Тараканов³

^{1,2}Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
Российская Федерация, 129366, г. Москва, Бориса Галушкина, 4.

³Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, 153048, г. Иваново, пр-кт Строителей, 33.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Проанализировать работы в области многоагентных технологий за период 2005–2016 гг. В первую очередь были отобраны публикации, освещающие вопросы применения многоагентных технологий в различных сферах и предметных областях: логистика, безопасность, информационный поиск, управление рисками, здравоохранении и др. Особое внимание уделено работам, посвященным вопросам применения многоагентных технологий для обеспечения безопасности в техносфере. Необходимость применения многоагентных систем (МАС) для решения вопросов управления безопасностью в техносфере вызвана прежде всего сложностью современных систем и организаций, которая достигает такого уровня, что централизованное управление в них становится неэффективным из-за наличия большого потока информации. Это приводит к большим временным затратам на ее обработку и принятие решений. **МЕТОДЫ.** Путем сравнительного анализа проведенных исследований установлены основные инструментальные программные средства разработки многоагентных систем, а также определена целесообразность использования многоагентных технологий для решения задач в области безопасности техносферы. **РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА.** Выявлено, что большинство исследований, за исключением небольшого количества работ, не дошли до программной реализации, то есть так и остались на теоретическом уровне. Тем не менее этими публикациями авторы внесли существенный вклад в развитие теории агентного подхода. В настоящей же статье определены перспективные направления дальнейших исследований применения многоагентного подхода в области безопасности техносферы.

Ключевые слова: анализ, техносферная безопасность, многоагентные системы, управление безопасностью, искусственный интеллект, системы поддержки принятия решений.

Формат цитирования: Смирнов А.В., Хабибулин Р.Ш., Тараканов Д.В. Применение многоагентного подхода для поддержки управления безопасностью в техносфере // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 118–133. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-118-133

USE OF MULTI-AGENT APPROACH FOR TECHNOSPHERE SAFETY MANAGEMENT SUPPORT

A.V. Smirnov, R.Sh. Habibulin, D.V. Tarakanov

Fire Fighting Service of State Academy of Emercom of Russia,
4 Borisa Galushkina St., Moscow 129366, Russian Federation

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters
33 Stroitelei pr., Ivanovo 153048, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the article is to review the researches in the field of multi-agent technologies for the period from 2005 to 2016. In the first place the analysis was given to the articles covering the application issues of multi-agent technologies in various fields and object domains: logistics, security, information retrieval, risk management, health care, etc. with the focus on the works dealing with the issues of using multi-agent technologies ensuring security in tech-

¹Смирнов Андрей Владимирович, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, e-mail: a_smirnov8@mail.ru

Andrei V. Smirnov, Postgraduate of the Faculty of Academic and Teaching Staff Training, e-mail: a_smirnov8@mail.ru

²Хабибулин Ренат Шамильевич, кандидат технических наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий.

Renat Sh. Habibulin, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Educational and Research Complex of Automated Systems and Information Technologies.

³Тараканов Денис Вячеславович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ.

Denis V. Tarakanov, Candidate of technical sciences, Lecturer of the Department of Fire Tactics and Foundations of Rescue Works and other Emergencies.



nosphere. The need for the use of multi-agent systems (MAS) for solving the issues of security management in technosphere first of all is determined by the complexity of modern systems and organizations. This makes the centralized management inefficient due to the presence of large information flows. **METHODS.** Having performed a comparative analysis of the conducted studies, the main software tools used for the development of multi-agent systems have been identified and the application feasibility of multi-agent technologies for solving technospheric safety problems has been determined. **ANALYSIS RESULTS.** It has been revealed that most studies except for a small number of works do not contain program implementation, that is, they haven't moved further than the theoretical level. Nevertheless, the authors of these publications have made a significant contribution to the development of the theory of agent approach. The present article outlines the promising directions of further studies of multi-agent approach application in the field of technosphere safety.

Keywords: analysis, technosphere safety, multi-agent systems, security management, artificial intelligence, decision support systems

For citation: Smirnov A.V., Habibulin R.Sh., Tarakanov D.V. Use of multi-agent approach for technosphere safety management support. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 118–133. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-118-133

Введение

Обеспечение безопасности в техносфере является одной из важнейших функций государства, бизнеса, для осуществления которой необходима разработка современных информационных систем поддержки управления. Проанализировав особенности возникновения и развития аварий на различных объектах защиты, можно сделать вывод о том, что для уменьшения количества пожаров, чрезвычайных ситуаций и последствий от них необходимо совершенствовать вопросы управления безопасностью в техносфере.

На сегодняшний день многоагент-

ные системы (МАС) применяются в самых различных сферах и предметных областях: логистика, безопасность, информационный поиск, управление рисками, здравоохранение и др. Однако, несмотря на возрастающее распространение МАС, трудоемкость процесса их разработки остается чрезвычайно высокой, что и порождает проблему создания универсального средства проектирования МАС, сочетающего теоретически обоснованную методологию проектирования и эффективную реализацию в объектно-ориентированной среде [1].

Научные работы по МАС

За последние годы проведено множество исследований, посвященных применению многоагентного подхода. Для проведения обзора по МАС отбирались научные работы, освещающие вопросы применения МАС в различных предметных областях [1–42]. При анализе особый акцент поставлен на работы, посвященные вопросам применения МАС для обеспечения безопасности в техносфере [8, 10, 11, 24, 37].

В публикации [1] речь идет о реализации инструментального программного комплекса DISIT для построения мультиагентных систем. Показано, из чего состоит этот комплекс, описан процесс проектирования.

В работе [2] говорится о применении многоагентного подхода при построении систем физической защиты, в частности, систем контроля доступа. Говорится о нечеткой логике в принятии решений на основе приближенных рассуждений. Предложена модель системы контроля доступа.

В статье [3] рассматриваются основные способы применения интеллектуальных методов и алгоритмов, синтезированных на их основе, представления данных сетевого мониторинга для управления рисками информационной безопасности защищенных мультисервисных сетей (ЗМС). В качестве основных способов повышения оперативности управления в данной работе предлагаются способы умень-



шения времени анализа исходных данных и способы уменьшения времени выработки и принятия управленческих решений. При этом качество управления, а именно, значения целевых функций, которые подлежат оптимизации, должны оставаться в области парето-оптимальных значений. Для решения данной проблемы в работе предлагается применение классификации и ранжирования, а также методов нечеткой кластеризации. Проведенные исследования предложенных методов показали возможность их функционирования в режиме, близком к режиму реального времени.

Публикация [4] посвящена процессу развития агентно-ориентированных систем (АОС), возникших в результате технической эволюции информационных и программно-аппаратных средств современной инфосферы. Подробно рассмотрены такие понятия, как *интеллектуальный агент* (ИА), *мультиагентная система* (МАС), *агентно-ориентированная система*. Рассмотрены также инструментальные средства создания агентно-ориентированных приложений, приведены примеры использования интеллектуальных агентов в промышленных информационно-телекоммуникационных системах.

В работе [5] идет речь о повышении эффективности управления информационной безопасностью предприятия за счет сочетания централизованного (автоматизированного рабочего места администратора) и децентрализованного (комплекс интеллектуальных агентов) мониторинга и аудита управления информационной безопасностью предприятия.

В статье [6] рассмотрены методы согласованного управления в многоагентных системах (МАС) на основе нечеткой логики. Главная задача исследования – разработка универсальных методов, позволяющих сбалансировать и уравновесить взаимоотношения агентов в процессе их информационного взаимодействия.

В публикации [7] описана структура системы для поддержки принятия решения с применением агентно-ориентированного подхода. Во введении обозначены факто-

ры, замедляющие процесс принятия решения. В основной части рассмотрена предлагаемая структура информационной системы. В заключении сделан вывод о том, что предложенная структура не только позволит решить обозначенные проблемы, но и проводить автоматизированное исследование данных и осуществлять мониторинг конкретных ситуаций в отсроченном режиме.

В статье [9] показана применимость агентных технологий для управления группой летательных аппаратов, осуществляющих мониторинг районов чрезвычайных ситуаций. Особенностью этих технологий является выработка коллективной стратегии функционирования летательных аппаратов.

В статье [11] показана возможность и перспективность введения многоагентных систем в структуру систем поддержки принятия решения. Представленная возможность классификации задач по отдельным признакам позволяет добиться ранжирования поставленных задач в зависимости от актуальности, эффективности и затраченных средств. Данный подход позволяет выделить именно те задачи, которые с наибольшей эффективностью, минимумом затраченных средств и в ограниченные промежутки времени приведут к выполнению поставленных целей. Однако стоит сказать, что существующие многоагентные системы при рассмотрении их в рамках систем поддержки принятия решений (СППР) не в полной мере удовлетворяют требованиям по эффективному и спрогнозированному принятию решения. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о необходимости создания математической модели СППР, модели, способной решать задачи самоупорядочности и самоорганизации агентов, исходя из сложившихся условий.

В публикации [12] рассмотрены бизнес-процессы планирования технического обслуживания и ремонта оборудования иерархического многофилиального предприятия на примере распределительных сетевых компаний электроэнергетики.



Предложен способ организации системы информационной поддержки данных бизнес-процессов на основе агентно-ориентированного подхода с использованием программного комплекса DISIT.

В статье [14] говорится о программной среде AgentITS. Инструментарий AgentITS, состоящий из интерактивных мастеров и панелей свойств, формирует среду, оптимизированную для создания распределенных интеллектуальных систем учебного назначения, которые должны формировать ответы на запросы пользователей посредством выполнения специализированных процедур поиска и распределенной обработки знаний, а также осуществлять адаптивное обучение с использованием персональных обучающих агентов. Инструментарий AgentITS включает такие группы программных средств, как среда выполнения MAC и инструментальная среда разработки многоагентных банков знаний. Агентская платформа отвечает за обеспечение жизнедеятельности агентов в составе MAC и представляет собой систему промежуточного уровня (middleware), которая находится между агентами и операционной системой. Основные функции агентной платформы состоят в управлении агентами, обеспечении передачи сообщений между агентами, в поиске агентов и данных о них внутри системы, поддержке онтологий. Инструментальная проблемно-ориентированная среда AgentITS упрощает процесс создания персональных интеллектуальных агентов, а также агентов обучающих ресурсов, осуществляющих доступ к учебным материалам с удаленных компьютеров.

В публикации [15] дана строгая формулировка понятия причинно-следственной модели сложного явления и сформулированы правила представления подобных моделей в виде причинно-следственных диаграмм. Проанализировано соотношение между причинно-следственным моделированием и традиционными методами математического моделирования. Приведены примеры причинно-следственных моделей (диаграмм) явлений

различной физической природы и продемонстрировано использование подобных моделей при исследовании некоторых конкретных задач. В частности, рассмотрен механизм перенормировки констант скоростей химических реакций в рамках явления диссипативного резонанса.

В работе [16] на основе многоагентного подхода предложены: методика оценки совместной реализации проектов; алгоритм повышения вероятности успешной реализации проекта в зависимости от средств, выделенных на устранение рисков, и алгоритм согласованного выбора проектов при заданных критериях оценок проекта для различных участников. Разработана и апробирована многоагентная модель развития территориальной системы и модель концессионных отношений государства и частного сектора при реализации крупных проектов. Предложен гибридный подход на базе аппарата нейронных сетей и марковских цепей для прогнозирования значений заданных показателей многоагентной среды в будущем. Разработан программный инструмент aMoSe для планирования и моделирования хода выполнения государственно-частных проектов.

В статье [17] обосновывается необходимость использования для управления сложными системами интеллектуальных информационных технологий и систем поддержки принятия решений. Анализируются понятия *система гибридного интеллекта*, *разумные управляющие системы*, *генетический алгоритм*. Рассмотрены методы и схемы эволюционных вычислений, основные положения направления «роевого интеллекта», способы организации коллективной работы специалистов в компьютерных сетях, особенности и преимущества метода генетического консилиума. Рассмотрены подходы к созданию теории сетевых систем коллективного интеллекта.

В публикации [18] предлагается способ описания и анализа поведения интеллектуальных агентов в команде. Рассмотрены некоторые особенности агентного взаимодействия, представление знаний о которых затруднено, и сделан вывод о



необходимости разработки нового языка представления знаний. Разработан синтаксис языка представления знаний, рассмотрены его отличительные особенности. Предложен концепт программного инструмента анализа поведения команд агентов, основанных на знаниях.

В работе [19] обосновывается необходимость интеллектуализации информационных и организационных процессов в управлении социально-экономическими системами, необходимость построения и внедрения методов и систем искусственного интеллекта (ИИ) и интеллектуальных технологий поддержки принятия решений. Приведены составляющие информационных технологий бизнес-интеллекта и управления знаниями. Рассмотрены понятия *интеллект*, *интеллектуальная система*, их свойства и особенности, направления моделирования мышления. Рассмотрены цели и задачи, которые ставятся перед теорией ИИ, основные подсистемы, входящие в систему ИИ. Приведены основные принципы построения нечетких интеллектуальных систем поддержки принятия управленческих решений.

В статье [20] проанализированы особенности агентных технологий и перспективы их использования для разработки сложных многопользовательских программных систем. Предложен агентный подход к созданию компьютерной системы поддержки дистанционного обучения. Описано использование инструментария (JADE) для создания прототипа такой системы.

На примере многоагентной системы в публикации [21] рассмотрено создание интеллектуальной компьютерной системы поддержки принятия решений с самоорганизацией на основе анализа взаимодействия участников. Представлена универсальная структура системы, реализующей данный подход. Приведены результаты тестирования различных типов архитектур на предмет вероятности возникновения синергетического эффекта и оценки его влияния на качество решения сложных задач. Показано, что именно эффект самоорганизации

в системах поддержки принятия решений обуславливает высокое качество решений, предлагаемых такими системами. Представлен алгоритм определения типа архитектуры МАС по степени согласованности взаимодействия агентов, а также многоагентная система с самоорганизацией.

В работе [22] формулируются задачи компьютерных систем поддержки принятия решений, рассматриваются факторы, влияющие на возможности таких систем, и трудности, возникающие при их реализации и применении. Обсуждаются методы компьютерного анализа ситуаций, компьютерной генерации и оценки возможных решений, моделирования принимаемых решений и компьютерной поддержки согласования групповых решений. Показаны возможности этих систем.

В статье [23] обсуждаются основания субъектно-ориентированного управления в социальных и экономических системах. Первое основание строится на субъективности любого управления в социальных и экономических системах, поскольку все подобные системы управляются людьми, служат людям или затрагивают их интересы. Второе основание исходит из того, что своей эффективностью управление обязано феномену ментальной деятельности субъекта управления, заключающейся в способности видеть будущее окружающего мира через множество целей, осуществлять ранжирование и осознанный выбор целей и способов их достижения в соответствии со своими предпочтениями, коммуникативного общения на естественном языке для развития эмерджентности организационных систем. Третье основание предусматривает развитие особых свойств человека, составляющих феномен его субъективной деятельности, на основе перехода от описательных моделей поведения человека к формальным моделям в задачах формирования целей управления и от формальных моделей к описательным – в задачах выбора действий субъекта управления. Четвертое основание заключается в необходимости устранения сложившегося разрыва между описательными и матема-



тическими теориями управления, субъектно-ориентированным обоснованием целей управления и выбора действий. Пятое основание в пользу развития новой математической управленческой дисциплины предполагает возможности исследования достаточно широкого спектра управленческих явлений в социальных и экономических системах, конструктивно оперируя базовыми понятиями и объектами субъектно-ориентированного управления, что соответствует построения нового раздела математики – исчисление моделей предпочтений.

В работе [25] рассматривается применение специально интегрируемых в традиционные системы автоматизированного проектирования или используемых автономно в виде многоагентной системы экспертной критики – агентов экспертной критики (АЭК), основанных на формализованных знаниях проектировщиков и многоагентной технологии. АЭК как согласованная система агентов принадлежит к данному классу МАС. Они получают на входе описание задачи и (или) предложенный проектировщиком вариант решения или действия, а в качестве результата генерируют критику решений и действий. Подобная критика воздействует на проектировщиков с целью интенсификации их творческих возможностей, что позволяет направлять их последующие действия, ограждать от совершения ошибок в рассуждениях или действиях и реализовать корректировку неверных (нерациональных) решений. АЭК в большей степени ориентированы на поддержку работы проектировщиков-экспертов.

В статье [26] для информационной поддержки принятия решений и повышения уровня координации субъектов региональной безопасности разработан прототип сетцентрической мультиагентной информационно-аналитической среды поддержки управления региональной безопасностью «Безопасный виртуальный регион» с унифицированной точкой доступа на основе веб-технологий. Ядро и компоненты распределенной информационной среды об-

разуют иерархическое виртуальное пространство региона как интеграционную площадку для проблемно-ориентированных ситуационно-коалиционных МАС поддержки управления рискоустойчивым региональным развитием.

В публикации [27] рассмотрена задача анализа и оптимизации функционирования предприятия. В качестве инструментария моделирования и поддержки принятия решений предложено использовать мультиагентные технологии. Определены проблемы, которые сопровождают процесс моделирования, построены модели с использованием продукционных правил и разработан метод оптимизации на основе изменения множества задач, структуры производства и стратегии управления предприятием.

В статье [28] рассмотрены основные принципы построения открытых МАС для поддержки процессов принятия решений, базирующиеся на механизмах самоорганизации и эволюции. Рассмотрены особенности применяемого холистического подхода к построению указанных систем, представлена структура разработанных инструментальных средств для их реализации, а также показаны примеры применения указанных систем в области управления предприятиями, логистики и электронной коммерции.

Работа [29] посвящена рассмотрению проблем моделей представления знаний в системах принятия решений. Предложены способы организации моделей представления предметных знаний в интегрированных системах поддержки управленческих решений. Рассмотрены модели и подходы к организации знаний. Показано, что процесс проектирования ИСППР требует применения различных моделей знаний, поэтому при создании архитектуры информационных систем необходимо обеспечить эффективное использование всех имеющихся в системе видов знаний для поддержки управления процессами принятия решений. Разделение знаний по уровням представления обеспечивает



расширение области применимости системы и позволяет:

- ускорить процесс в целом за счет уменьшения времени принятия решения на трудноформализуемых этапах;
- улучшить качество принятия решений за счет использования накопленного опыта;
- уменьшить влияние субъекта (пользователя) на процесс принятия решений.

В публикации [30] описаны нечеткие генетические алгоритмы в информационных технологиях. При применении генетических алгоритмов все переменные задачи оптимизации должны быть определенным образом закодированы. Сущность кодирования заключается в преобразовании любого числового значения в некоторую последовательность символов конечного алфавита, состоящего обычно из небольшого числа элементов. Показана модель нечеткого генетического алгоритма.

Структура каждого агента может быть условно обозначена следующей формулой:

Агент = Архитектура + Программа.

Применение принципов построения МАС к задаче синтеза архитектуры прикладной подсистемы оптимизации позволяет организовать распараллеливание основных технологических процессов при поиске и выборе решений. Предложена архитектура подсистемы оптимизации.

В работе [31] описывается предлагаемая авторами методика построения МАС для решения энергетических задач, в частности, задачу оценивания состояний электроэнергетических систем. Методика включает использование агентных сценариев для формирования пользователем последовательности вызова тех или иных агентов. Для описания сценариев применяются событийные модели на основе Joiner-сетей, в которых процессы функционирования каждого агента являются узлами сети, а события являются сигналами о прекращении выполнения процессов. В статье

описывается разработка многоагентной системы оценивания состояний электроэнергетических систем с использованием предлагаемой методики. На данном этапе выполнена реализация агента декомпозиции исходной схемы электроэнергетических систем по уровням напряжения. Проведено сравнение расчетов общей схемы сети с расчетами получившихся подсистем. Результаты вычислительного эксперимента представлены в статье для демонстрации корректной работы системы. Новизна работы заключается в применении многоагентного подхода для решения задач в области энергетики и использовании событийного моделирования на основе Joiner-сетей для описания сценариев.

В статье [32] рассмотрены особенности реализации МАС, связывающей интеллектуальных агентов научно-образовательной деятельности с репозиторием научно-образовательных объектов и сервисов. Представлена интеграция распределенных в вычислительной сети разнородных источников знаний и сервисов для реализации коллективного доступа к нему различных категорий участников научно-образовательных процессов на основе многоагентного и онтологического подходов. Предлагаемая в работе организация информационно-образовательного пространства на основе многоагентного и онтологического подходов позволяет осуществлять интенсивное и динамичное наращивание научно-образовательного контента и создаст условия для развития виртуальной академической мобильности преподавателей, научных работников и обучающихся.

В публикации [33] предлагается формальный способ представления желаний и намерений интеллектуального агента и выбора решения в группе таких агентов при возникновении новой задачи на основе использования понятия решетки. В данной работе рассматривается вопрос об изменении задачи интеллектуального агента, принадлежащего группе одного типа объектов, в случае, когда намерения разных агентов этой группы ранжируются в соот-



ветствии с разными критериями. Для того чтобы сравнивать предпочтения, характеризующиеся разными критериями, и выбирать объект для решения новой задачи, предлагается использовать аппарат теории решеток.

В работе [34] рассматривается проблема управления взаимодействия персонала в интеллектуальных организациях при решении ими творческих задач в условиях неопределенности внешней среды и риска. Показано, что рост суверенности субъектов управления при этом требует со стороны менеджеров верхнего уровня особых форм управления, основанных на дальновидных формах развития мотивации, креативности агентов.

В работе [35] предложено семейство МАС, в которое входят:

- модели, применяемые в естественных науках;
- эвристические оптимизационные алгоритмы – генетические алгоритмы и алгоритмы «роя частиц»;
- модели типа «хищник–жертва»;
- модели распространения вирусов и др.

Показана связь систем данного семейства с марковскими процессами. Исследован ряд конкретных моделей и алгоритмов: модель сегрегации Шеллинга, игра с логлинейным правилом принятия решения, алгоритм имитации отжига. Показана возможность их формального представления в виде однородной цепи Маркова, построены альтернативные доказательства вероятностных оценок их поведения, что позволило объяснить ряд закономерностей, определяющих различные аспекты поведения такого рода моделей. Реализован программный комплекс, который предоставляет возможность легко создавать программные модели многоагентных систем, описанных в терминах рассматриваемого в диссертационной работе семейства, содержит средства управления системами и средства исследования процессов их функционирования. Проведено сравнение с рядом известных многоагентных программных платформ. Построена

многоагентная модель развития транспортной сети в условиях изменяющихся грузопотоков и конкуренции между операторами перевозок. Реализован комплекс программ, предназначенный для моделирования возможных путей развития мировой хозяйственной системы, анализа и визуализации исходных статистических данных и полученных результатов.

В публикации [36] рассматриваются принципы построения агентно-ориентированной системы имитационного моделирования. Известно, что агентные модели расширяют возможности применения метода имитационного моделирования при решении ряда задач, которые методами системной динамики или событийно-ориентированного моделирования решены быть не могли. Особое внимание при проектировании агентно-ориентированной системы имитации авторы уделяют проблемам реализации распределенного моделирования, реализации интеллектуальных агентов и использованию онтологий на всех этапах имитационного моделирования.

В статье [38] рассматриваются подходы к определению типа интеллектуальных агентов и состояния МАС, основанные на теории нечетких множеств и нечеткой логике. Описываемые в работе понятия и методы иллюстрируются на примерах определения типа агентов и приведения МАС в состояние компромисса. Также в статье обозначены задачи, актуальные при разработке моделей межагентного взаимодействия. Нечеткая логика является удобным средством обучения и мониторинга МАС. Управление на основе нечеткой логики позволяет сформировать базу нечетких правил для осуществления оптимальных управляющих воздействий на ИА с целью разрешения конфликтов и противоречий, возникающих в МАС. При этом оптимальным решением является внедрение формулы управления в антропоморфную сущность ИА с тем, чтобы ее действие было неявным: «Мне никто не дает команд, но мое поведение управляется моей собственной концепцией Я, содержащей прин-



ципы, согласно которым я должен вести себя именно так, а не иначе».

В публикации [39] рассмотрены методы управления конфликтом в МАС. Показано, что хоть выбор метода и зависит от типа конфликта, все же используется совокупность всех методов. Описанные методы имеют общие черты, такие как последовательные уступки, итерационность и косвенное или прямое вмешательство в конфликт третьей стороны, которая исключает его путем согласования поведенческих стратегий агентов, приведения их к компромиссу.

В работе [40] показаны модели конфликта, в которых агенты представлены различными описаниями собственных знаний о ситуации в целом, формализованных в виде линейных когнитивных карт. Также продемонстрированы эффекты, которые возникают при работе агентов с несогласованными представлениями. Это позволило решать задачи информационного управления на когнитивных картах. Управление может осуществляться как агентами, так и внешними сторонами для достижения собственных целей.

В статье [41] рассмотрен подход к созданию интеллектуальных агентных систем для решения задач, возникающих при управлении территорией муниципального уровня. Основной особенностью работы является использование ГИС при построении МАС для осуществления интеллектуального анализа данных.

В публикации [42] показано использование МАС для обеспечения безопасности крупномасштабных военных и транспортных систем. Рассмотрены аспекты обеспечения процесса безопасного функционирования МАС, в частности, анализу рисков: определению различных причинно-следственных связей, в результате чего функционирование системы может привести к опасным последствиям. Показаны проблемы анализа опасностей МАС и описываются требования, предъявляемые к любому методу, направленному на реше-

ние определенных задач. Создано программное средство SimHAZAN, представляющее автоматизированный подход анализа опасностей для МАС, позволяющий избежать некоторых проблем, связанных с существующими методами.

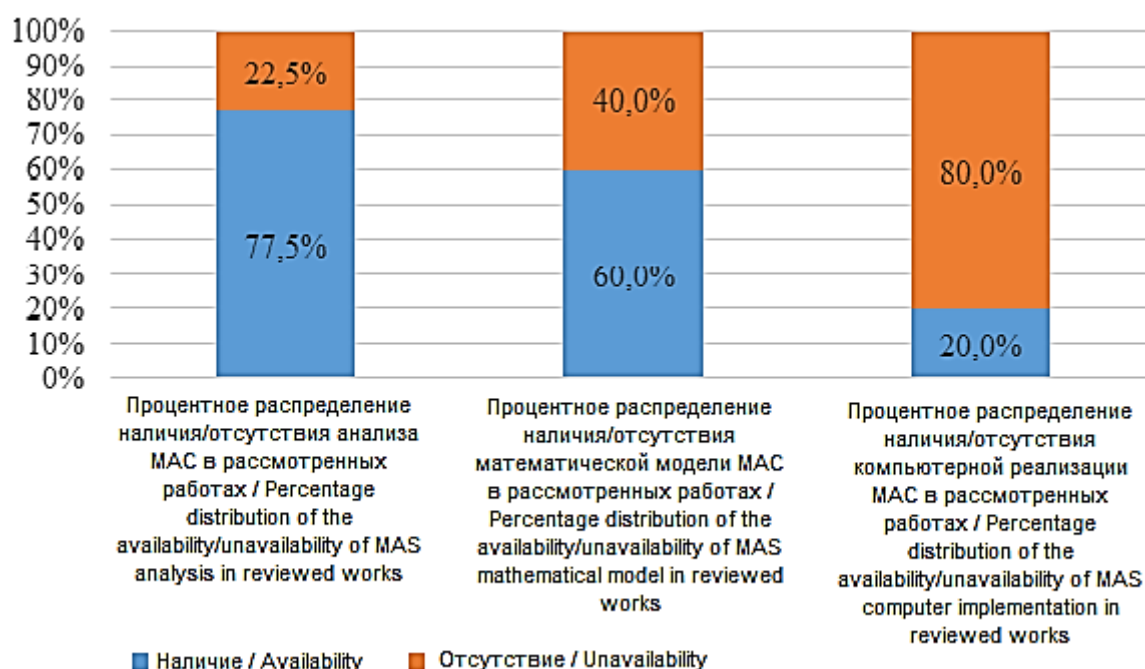
Результаты анализа научных работ, посвященных МАС, показали, что авторы, как правило, ограничиваются лишь теоретической проработкой вопросов, до программной реализации работы зачастую не доходят, а в большинстве случаев не указывается и математическая составляющая алгоритмической структуры МАС. Например, в работах, посвященных МАС, в 77,5% представлен теоретический анализ МАС, в 60% – математическая модель, и в 20,0% – практическая компьютерная реализация. Обобщенные количественные данные по показателям степени проработки МАС представлены на рисунке.

Проанализировав работы, освещающие применение многоагентного подхода для различных сфер деятельности, были сделаны следующие выводы:

1. МАС наиболее распространены при решении задач автоматизации управления сложными системами, для сбора и обработки информации, в играх. Многоагентные технологии применяются в управлении мобильными ресурсами, а также в таких сферах, как проектирование объектов, промышленное производство, финансовое планирование и анализ рисков, распознавание образов, извлечение знаний из данных, понимание текста и решение других сложных проблем.

2. Основными тенденциями в области МАС являются искусственная жизнь и распределенный искусственный интеллект. При решении сложной задачи часто бывает необходимо разбить ее на подзадачи, которые поручаются отдельным агентам.

Основные инструментальные программные средства разработки МАС представлены в таблице.



Результаты анализа работ по MAC
Analysis results of MAS operation

Основные средства разработки MAC
Main tools of MAS development

Наименование программного продукта / Software product	Описание / Description
JADE (Java Agent Development Framework)	Программная среда разработки MAC и приложений поддерживает FIPA-стандарты для интеллектуальных агентов / Software of MAS and applications development, supports FIPA standards for intelligent agents
JACK Intelligent Agents	Java платформа для создания MAC. Одна из немногих платформ, применяющих модель логики агентов, основанной на убеждениях-желаниях-намерениях, и встроенные формально-логические средства планирования работы интеллектуальных агентов / Java platform for MAS creation. One of the few platforms using the agent logic model based on beliefs-desires-intentions and embedded formal-logical means planning the operation of intelligent agents
DISIT (Distributed Intellectual System Integrated Toolkit)	Средство проектирования распределенных интеллектуальных систем / Design tool for distributed intelligent systems
MATLAB	Пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений. Язык программирования позволяет проектировать MAC / Application program package for solving technical computing problems. Programming language enabling MAS design
MadKIT	Модульная и масштабируемая мультиагентная платформа, написанная на Java, поддерживает агентов на разных языках: Java, Python, Jess, Scheme, BeanSchell / Modular and scalable multi-agent Java platform that supports the agents in different languages: Java, Python, Jess, Scheme, BeanSchell



Применение МАС для поддержки управления безопасностью в техносфере

В изученных работах рассматриваются различные аспекты техносферы:

- экологическая безопасность;
- безопасность систем промышленных объектов;
- прогнозирование динамики технического состояния промышленных объектов;
- охрана труда в организациях;
- моделирование действий оперативных подразделений при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций.

Необходимость применения МАС для решения вопросов управления безопасностью в техносфере вызвана в первую очередь сложностью современных систем и организаций, которая достигает такого уровня, что централизованное управление в них становится неэффективным из-за наличия больших потоков информации. Это приводит к большим временным затратам на передачу ее в центр и принятия решений.

В публикации [8] представлена структура МАС управления экологической безопасностью, отличительной особенностью которой является распределенный подход к управлению эколого-экономической системой, интеграция больших массивов информации и оперативная обработка результатов. Разработанные модели поведения агентов обеспечивают взаимодействие экологических органов и предприятий, самостоятельно находят и применяют индивидуальные решения для всех факторов, обладающих большим количеством персональных особенностей, создавая предложения по индивидуальным схемам управления. Предложенная модель дает возможность прогнозировать результат, сравнивать прогноз и результат, принимать определенную стратегию действия и в случае необходимости корректировать ее при изменениях среды.

В статье [10] описан алгоритм оценки состояния промышленных систем на основе нечеткой марковской модели, узлами которой являются интегральные показате-

ли безопасности. Разработан алгоритм поиска центра безопасности технологии и алгоритм оценки состояний МАС технологических процессов. Узлы графа могут быть созданы и на основе риск-показателей. Разработанная технология обеспечивает адаптацию к конкретной задаче и позволяет выполнять диагностику объекта уже на этапе расчета показателя надежности. Гибкость технологии достигнута за счет того, что состояние надежности оценивается сразу по нескольким показателям. Диагностика на этапе вычисления интегрального показателя состояний достигнута за счет того, что вычисления можно разделить на разные этапы. Каждый этап оценивает какой-либо из отдельных показателей, что позволяет сделать вывод о состоянии соответствующего элемента.

В публикации [13] рассмотрена система имитационного моделирования динамики состояния сложных технических систем, имеющих в своем составе уникальные механические системы. Представлена модель агента, классы состояний, отражающие этапы процесса изменения технического состояния: от состояния исходной дефектности до отказа. Представлен детерминированный подход к прогнозированию технического состояния. Отказ рассмотрен не как случайное событие, для которого осуществляется оценка вероятности наступления, а как процесс, обусловленный деградацией уникальных механических систем. Подробное описание данного процесса обеспечивает возможность получения более точных результатов прогнозирования динамики технического состояния. Результаты имитационного моделирования являются основой поддержки принятия решений при обеспечении безопасности на всех стадиях жизненного цикла промышленных объектов. Результаты имитационного моделирования могут быть использованы и для задач анализа и оценки риска аварийных ситуаций и аварий.

В работе [24] разработана методика, позволяющая оценить влияние различных факторов на состояние условий и охрану



труда в организации и на этой основе осуществлять поддержку принятия решений для формирования эффективного управляющего воздействия. Разработанная методика позволяет оценивать влияние различных факторов на состояние условий и охрану труда в организации, что позволяет производить научно-обоснованную поддержку принятия управленческих решений в системе управления охраной труда и вырабатывать эффективное управляющее воздействие в случае выявления нарушений.

В статье [37] разработаны теоретические модели, объединенные в много-агентную систему для моделирования действий оперативных подразделений пожарной охраны при тушении пожаров в социальных зданиях, оснащенных системами и средствами мониторинга состояния пожара. Созданную «интеллектуальную много-агентную систему», в которой процессы

управления реализуются по принципу «искусственная жизнь», определяет отношение количества когнитивных и реактивных агентов, совокупность правил их взаимодействия. Для разработки МАС автором выбрана модульная структура, что позволяет наращивать возможности системы путем ввода новых математических моделей и реализующих их программных модулей.

В целом обзор публикаций показал, что агентный подход активно используется для решения различных задач, связанных с вопросами обеспечения безопасности в техносфере. В рассмотренных теоретических работах вопросы практической реализации МАС освещены не в должном объеме по причине трудоемкости программной реализации математических моделей. Практически не отражены вопросы применения МАС в области поддержки управления пожарной и промышленной безопасностью на производственных объектах.

Заключение

В ходе обзора были рассмотрены работы, посвященные исследованиям в сфере разработки многоагентных информационных систем. Особое внимание уделено работам, затрагивающим вопросы применения МАС для решения проблем управления безопасностью в техносфере. Необходимость разработки МАС обусловлена нормативными требованиями постоянного повышения уровня обеспечения безопасности экологических и промышленных систем. Здесь под безопасностью подразумевается не только прямое значение данного термина, но и совокупное взаимодействие сложных систем, с повышением

эффективности их функционирования.

За исключением небольшого количества работ, многие исследования не дошли до программной реализации, то есть так и остались на теоретическом уровне. Однако авторы этих работ внесли существенный вклад в развитие теории агентного подхода.

По результатам анализа можно сделать вывод, что перспективными направлениями дальнейших исследований в области МАС являются экологическая безопасность, пожарная и промышленная безопасность, а также охрана труда.

Библиографический список

1. Швецов А.Н., Сергушичева М.А. Сорокин С.И. Реализация инструментального комплекса DISIT для построения мультиагентных систем // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2006. № 11. С. 126–137.
2. Тарасов А.Д. Система физической защиты на основе агентно-ориентированного подхода и нечеткой логики // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: материалы XII Междунар. конф. (Самара, 21–23 июня 2010 г.). Самара, 2010. С. 650–656.

3. Агеев С.А. Применение интеллектуальных методов представления информации для управления рисками информационной безопасности в защищенных мультисервисных сетях специального назначения // СПИИРАН. 2015. № 4 (41). С. 149–162.
4. Швецов А.Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям // Всерос. конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы»: сб. ст. М.: Изд-во ГНИИ ИТТ «Информатика», 2008. С. 1–101.



5. Цыбулин А.М. Подход к построению автоматизированной системы управления информационной безопасностью предприятия // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2011. № 5. С. 86–89.
6. Мutowкина Н.Ю., Кузнецов В.Н., Ключин А.Ю., Палюх Б.В. Нечеткие методы согласованного управления в многоагентных системах // Вестник ТГТУ. 2013. Т. 19. № 4. С. 740–750.
7. Козьминых Н.М. Структура системы информационной поддержки управленческих решений на основе агентно-ориентированного подхода // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. С. 205–212.
8. Еременко Ю.И., Доронина Е.Г. Модель адаптивного поведения агентов мультиагентной системы управления экологической безопасностью // Прикладная информатика. 2010. № 2 (26). С. 71–82.
9. Абросимов В.К., Гончаренко В.И. Агентные технологии мониторинга районов чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 3 (61). С. 188–196.
10. Богатилов В.Н., Маслов А.А., Власов А.В., Кайчонов А.В., Пискарева А.Д. Разработка технологии оценки состояния промышленных систем на основе показателя безопасности и принятие решений целеустремленного поведения агента // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2013. Т. 16. № 4. С. 654–662.
11. Вяткин А.Ю., Смирнов Д.В., Кочетов И.А. Многоагентные системы как возможность реализации систем поддержки принятия решений // Электронные средства и системы управления. 2015. № 1-2. С. 234–238.
12. Сергушичева М.А., Швецов А.Н. Иерархическая распределенная система поддержки управления техническим обслуживанием и ремонтом энергооборудования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 3. С. 14–19.
13. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И. Агентная система моделирования динамики состояний сложных технических систем // Материалы XII Всерос. совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014 (Москва, 16–19 июня 2014 г.). М.: Изд-во Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 8925–8933.
14. Зайцев Е.И. Агентно-ориентированная технология разработки распределенных интеллектуальных систем // Объектные системы – 2011: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (Ростов-на-Дону, 10–12 мая 2011 г.). Ростов/нД, 2011. № 3 (3). С. 109–114.
15. Карнаухов А.В. Причинно-следственное моделирование как общий метод описания и исследования явлений в сложных иерархически организованных системах // Биофизика. 2006. Т. 51. № 2. С. 373–381.
16. Чиркунов К.С. Мультиагентный подход и моделирование поведения взаимодействующих иерархических систем экономической природы: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11. Новосибирск, 2012.
17. Карелин В.П., Протасов В.И. Эволюционно-генетические и бионические методы моделирования коллективного интеллекта в системах управления и поддержки принятия решений // Вестник Таганрогского института управления и экономики. 2012. № 1. С. 71–76.
18. Никляев И.Ю. Инструментарий исследования команд интеллектуальных агентов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2009. № 12 (60). С. 86–88.
19. Карелин В.П. Интеллектуальные технологии и системы искусственного интеллекта для поддержки принятия решений // Вестник Таганрогского института управления и экономики. 2011. № 2. С. 79–84.
20. Глибовец Н.Н. Использование JADE (JAVA AGENT DEVELOPMENT ENVIRONMENT) для разработки компьютерных систем поддержки дистанционного обучения агентного типа // Образовательные технологии и общество. 2005. Т. 8. № 3. С. 325–345.
21. Кириков И.А., Колесников А.В., Листопад С.В. Исследование эффекта самоорганизации в компьютерных системах поддержки принятия решения на примере многоагентных систем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2010. № 10. С. 79–90.
22. Трахтенгерц Э.А. Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений // Проблемы управления. 2003. № 1. С. 13–28.
23. Харитонов В.А., Алексеев А.О. Концепция субъектно-ориентированного управления в социальных и экономических системах // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 109. С. 690–706. [Электронный ресурс]. URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/43.pdf>
24. Яговкин Н.Г., Кривова М.А. Методика поддержки принятия управленческих решений в системе управления охраной труда // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 2. С. 368–370.
25. Котенко И.В., Лихванцев Н.А. Многоагентная технология экспертной критики для интеллектуальной поддержки принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2001. № 4 (22). С. 17–25.
26. Маслובоев А.В. Мультиагентная информационно-аналитическая среда поддержки управления региональной безопасностью «безопасный виртуальный регион» // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 128–138.
27. Мысник Б.В., Снитюк В.Е. Мультиагентные технологии анализа и оптимизации функционирования предприятий отрасли // Математические машины и системы. 2015. № 2. С. 139–146.
28. Скобелев П.О. Открытые мультиагентные системы для поддержки процессов принятия решений при управлении предприятиями // Известия Самар-



ского научного центра Российской академии наук. 2001. Т. 3. № 1. С. 71–79.

29. Бова В.В., Курейчик В.В., Нужнов Е.В. Проблемы представления знаний в интегрированных системах поддержки управленческих решений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 7 (108). С. 107–113.

30. Гладков Л.А. Решение задач поиска и оптимизации решений на основе нечетких генетических алгоритмов и многоагентных подходов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2006. № 8 (63). С. 82–87.

31. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентной системы оценивания состояний электроэнергетических систем с использованием событийных моделей // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 9. С. 200–214.

32. Тельнов Ю.Ф., Трембач В.М. Многоагентная система реализации информационно-образовательного пространства высшего учебного заведения // Теория активных систем: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 17–19 ноября 2014 г.). М.: Изд-во Института проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2014. С. 280–282.

33. Легович Ю.С., Максимов Д.Ю. Принятие решений в группе интеллектуальных агентов // Теория активных систем: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 17–19 ноября 2014 г.). М.: Изд-во Института проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2014. С. 206–208.

34. Виноградов Г.П., Кузнецов В.Н. Постнеклассический подход к проблеме построения модели поведения интеллектуального агента // Теория активных систем: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 17–19 ноября 2014 г.). М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2014. С. 23–24.

35. Зайцев И.Д. Многоагентные системы в моделировании социально-экономических отношений: ис-

следование поведения и верификация свойств с помощью цепей Маркова: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.10. Новосибирск, 2014. 142 с.

36. Замятина Е.Б., Каримов Д.Ф., Митраков А.А. Архитектура агентно-ориентированной системы имитации с агентами, основанными на нейронных сетях // Информатизация и связь. 2014. № 2. С. 89–97.

37. Тараканов Д.В. Многоагентная система для моделирования действий по тушению пожаров в социальных зданиях // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» 2016. № 5 (69). [Электронный ресурс]. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>

38. Мutowкина Н.Ю., Ключин А.Ю., Кузнецов В.Н. Семантическое определение типа агента в многоагентной системе. Проблема межагентного взаимодействия // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: материалы III Междунар. научн.-техн. конф. (Минск, 21–23 февраля 2013 г.). Минск: Изд-во БГУИР, 2013. С. 309–316.

39. Мutowкина Н.Ю., Кузнецов В.Н., Ключин А.Ю. Методы согласованного управления конфликтом в многоагентной системе // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 3.2 (57). С. 255–261.

40. Куливец С.Г. Моделирование конфликтных ситуаций с несогласованными представлениями у агентов на основе игр на линейных когнитивных картах // Проблемы управления. 2010. № 4. С. 42–48.

41. Лазарев Е.М., Аксёнов К.А. Создание интеллектуальных программных агентов поиска градостроительных конфликтов (нарушений) // Автоматизация. Современные технологии. 2012. № 2. С. 41–44.

42. Alexander R., Kelly T. Supporting systems of systems hazard analysis using multi-agent simulation // Safety Science. 2013. No. 51. P. 302–318.

References

1. Shvetsov A.N., Sergushicheva M.A., Sorokin S.I. Implementation of the integrated tool set DISIT for building multi-agent systems. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannykh* [Algorithms, methods and systems for data processing]. 2006, no. 11, pp. 126–137. (In Russian)
2. Tarasov A.D. *Sistema fizicheskoi zashchity na osnove agentno-orientirovannogo podkhoda i nechetkoi logiki* [System of physical protection based on agent-based approach and fuzzy logic]. *Materialy XII Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"* [Materials of XII International Conference "Problems of control and modeling in complex systems"]. Samara, 2010, pp. 650–656. (In Russian)
3. Ageev S.A. Application of intelligent methods of information representation to manage information security risks in secure multiservice special-purpose networks. *SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings]. 2015, no. 4 (41), pp. 149–162. (In Russian)
4. Shvetsov A.N. *Agentno-orientirovannye sistemy: ot formal'nykh modelei k promyshlennym prilozheniyam* [Agent-oriented systems: from formal models to production-ready

- applications]. *Vserossiiskii konkursnyi otbor obzorno-analiticheskikh statei po prioritetnomu napravleniyu "Informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy": sbornik statei* [All-Russia competitive selection of review-analytical articles in the priority field "Information and Telecommunication Systems"]. Moscow: GNII ITT "Informatika" Publ., 2008, pp. 1–101. (In Russian)
5. Tsybulin A.M. Approach to the development of an automated control system of enterprise information security. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10: Innovatsionnaya deyatel'nost'* [Science Journal of Volgograd State University. Series 10: Technology and innovations]. 2011, no. 5, pp. 86–89. (In Russian)
6. Mutowkina N.Yu., Kuznetsov V.N., Klyushin A.Yu., Pal'yukh B.V. Fuzzy methods of coordinated management in multi-agent systems. *Vestnik TGTU* [Transactions of the TSTU]. 2013, vol. 19, no. 4, pp. 740–750. (In Russian)
7. Koz'minykh N.M. The structure of information support system of management decision on the base of agent-oriented approach. *Sovremennye problemy nauki i obra-*



- zovaniya [Modern problems of science and education]. 2012, no. 2, pp. 205–212. (In Russian)
8. Eremenko Yu.I., Doronina E.G. Model of adaptive behavior of the agents of a multi-agent environmental safety management system. *Prikladnaya informatika* [Applied informatics]. 2010, no. 2 (26), pp. 71–82. (In Russian)
9. Abrosimov V.K., Goncharenko V.I. Agent technologies for monitoring of regions of emergency situations. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti* [Technology of technosphere safety]. 2015, no. 3 (61), pp. 188–196. (In Russian)
10. Bogatkov V.N., Maslov A.A., Vlasov A.V., Kaichenov A.V., Piskareva A.D. Development of the technology evaluating industrial system states based on safety indicators and decision-making on agent's goal-seeking behavior. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the MSTU]. 2013, vol. 16, no. 4, pp. 654–662. (In Russian)
11. Vyatkin A.Yu., Smirnov D.V., Kochetov I.A. Multi-agent systems as an opportunity of decision support system implementation. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya* [Electronic tools and control systems]. 2015, no. 1-2, pp. 234–238. (In Russian)
12. Sergushicheva M.A., Shvetsov A.N. Multilevel distributed system of maintenance management support and power equipment repair. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information Technology of CAD/CAM/CAE (ITDP)]. 2009, no. 3, pp. 14–19. (In Russian)
13. Berman A.F., Nikolaichuk O.A., Pavlov A.I. *Agentnaya sistema modelirovaniya dinamiki sostoyanii slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Agent simulation system of complex technical system state dynamics]. *Materialy XII Vserossiiskogo soveshchaniya po problemam upravleniya. VSPU-2014* [Materials of XII All-Russia Meeting on Control Problems]. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 8925–8933. (In Russian)
14. Zaitsev E.I. Agentno-orientirovannaya tekhnologiya razrabotki raspredelennykh intellektual'nykh sistem [Agent-oriented development technology of distributed intelligent systems]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Ob"ektnye sistemy – 2011"* [Materials of II International Scientific and Practical Conference "Object systems- 2011"]. Rostov-na-Donu, 2011, no. 3 (3), pp. 109–114. (In Russian)
15. Karnaukhov A.V. [Cause-effect modeling as a general description and research method of phenomena in complex hierarchically organized systems]. *Biofizika* [Biophysics]. 2006, vol. 51, no. 2, pp. 373–381. (In Russian)
16. Chirkunov K.S. *Mul'tiagentnyi podkhod i modelirovanie povedeniya vzaimodeistviyushchikh ierarkhicheskikh sistem ekonomicheskoi prirody* [Multiagent approach and behavior modeling of interacting hierarchical systems of economic nature]. Candidate's Dissertation in Physical and Mathematical sciences: 05.13.11. Novosibirsk, 2012. (In Russian)
17. Karelin V.P., Protasov V.I. Evolutionary-genetic and bionic modeling methods of collective intelligence in management and decision support systems. *Vestnik Taganrogskogo instituta upravleniya i ekonomiki* [Bulletin of Taganrog Institute of Management and Economics]. 2012, no. 1, pp. 71–76. (In Russian)
18. Niklyayev I.Yu. Intellectual agent teams research toolkit. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Volgograd State Technical University]. 2009, no. 12 (60), pp. 86–88. (In Russian)
19. Karelin V.P. Intelligent technologies and artificial intelligence systems for decision support. *Vestnik Taganrogskogo instituta upravleniya i ekonomiki* [Bulletin of Taganrog Institute of Management and Economics]. 2011, no. 2, pp. 79–84. (In Russian)
20. Glibovets N.N. Use of JADE (Java Agent Development Environment) for the development of computer systems providing support of agent type distance learning. *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo* [Educational technologies and society]. 2005, vol. 8, no. 3, pp. 325–345. (In Russian)
21. Kirikov I.A., Kolesnikov A.V., Listopad S.V. Research of a self-organising effect in decision support computer systems on example of multi-agent systems. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskije nauki* [Immanuel Kant Baltic Federal University Vestnik. Series: Physico-Mathematical and Technical Sciences]. 2010, no. 10, pp. 79–90. (In Russian)
22. Trakhtengerts E.A. Computer systems of managerial decision support. *Problemy upravleniya* [Control Sciences]. 2003, no. 1, pp. 13–28. (In Russian)
23. Kharitonov V.A., Alekseev A.O. The concept of agent-based control in social and economic systems. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Multidisciplinary network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University]. 2015, no. 109, pp. 690–706. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/43.pdf>
24. Yagovkin N.G., Krivova M.A. Decision making support technique in labor safety management system. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector of science of Togliatti State University]. 2011, no. 2, pp. 368–370. (In Russian)
25. Kotenko I.V., Likhvantsev N.A. Multi-agent expert criticism technology for intelligence support of decision making. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]. 2001, no. 4 (22), pp. 17–25. (In Russian)
26. Masloboev A.V. Multi-agent system for information management and analytical support of regional security "Secure Virtual Region". *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2013, no. 4 (86), pp. 128–138. (In Russian)
27. Mysnyk B.V., Snityuk V.E. Multi-agent technologies for analysis and optimization of the functioning of industry enterprises. *Matematicheskie mashiny i sistemy* [Mathematical machines and systems]. 2015, no. 2, pp. 139–146. (In Russian)



28. Skobelev P.O. Open multi-agent systems for support of decision-making processes for company management. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2001, vol. 3, no. 1, pp. 71–79. (In Russian)
29. Bova V.V., Kureichik V.V., Nuzhnov E.V. Problems of knowledge presentation in management decision support of integrated systems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]. 2010, no. 7 (108), pp. 107–113. (In Russian)
30. Gladkov L.A. Solving the problems of search and optimization of solutions based on fuzzy genetic algorithms and multi-agent approaches. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]. 2006, no. 8 (63), pp. 82–87. (In Russian)
31. Massel' L.V., Gal'perov V.I. Development of multi-agent system of state estimation of electric power systems using event models. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU]. 2015, no. 9, pp. 200–214. (In Russian)
32. Tel'nov Yu.F., Trembach V.M. *Mnogoagentnaya sistema realizatsii informatsionno-obrazovatel'nogo prostanstva vysshego uchebnogo zavedeniya* [Multiagent implementation system of the information and educational space of a higher educational institution]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Teoriya aktivnykh sistem"* [Materials of the International scientific and practical conference "Theory of active systems"]. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 280–282. (In Russian)
33. Legovich Yu.S., Maksimov D.Yu. *Prinyatie reshenii v gruppe intellektual'nykh agentov* [Decision making in the group of intelligent agents]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Teoriya aktivnykh sistem"* [Materials of the International scientific and practical conference "Theory of active systems"]. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 206–208. (In Russian)
34. Vinogradov G.P., Kuznetsov V.N. *Postneklassicheskii podkhod k probleme postroeniya modeli povedeniya intellektual'nogo agenta* [Post-nonclassical approach to the problem of intelligent agent behavior model construction]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Teoriya aktivnykh sistem"* [Materials of the International scientific and practical conference "Theory of active

- systems"]. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 23–24. (In Russian)
35. Zaitsev I.D. *Mnogoagentnye sistemy v modelirovanii sotsial'no-ekonomicheskikh otnoshenii: issledovanie povedeniya i verifikatsiya svoistv s pomoshch'yu tsepei Markova* [Multiagent systems in socio-economic relations modeling: behavior study and verification of properties using Markov chains] Candidate's dissertation in technical sciences: 05.13.10. Novosibirsk, 2014, 142 p. (In Russian)
36. Zamyatina E.B., Karimov D.F., Mitrakov A.A. The architecture of agent-oriented simulation system with agents based on neural networks. *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication]. 2014, no. 2, pp. 89–97. (In Russian)
37. Tarakanov D.V. Multiagent system for fire fighting activity modeling in social buildings. *Internet-zhurnal "Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti"* [E-journal "Technology of Technosphere Security"]. 2016, no. 5 (69). Available at: (<http://ipb.mos.ru/ttb>)
38. Mutovkina N.Yu., Klyushin A.Yu., Kuznetsov V.N. *Semanticheskoe opredelenie tipa agenta v mnogoagentnoi sisteme. Problema mezhdunarodnogo vzaimodeistviya* [Semantic determination of the agent type in a multi-agent system. Problem of inter-agent interaction]. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh sistem"* [Materials of III International scientific and technical conference "Open semantic technologies for intelligent system design"]. Minsk: BGUIR Publ., 2013, pp. 309–316. (In Russian)
39. Mutovkina N.Yu., Kuznetsov V.N., Klyushkin A.Yu. Methods of coordinated conflict management in a multi-agent system. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technology]. 2014, no. 3.2 (57), pp. 255–261. (In Russian)
40. Kulivets S.G. Modeling conflict situations with mismatched representations of agents based on linear cognitive map games. *Problemy upravleniya* [Control Sciences]. 2010, no. 4, pp. 42–48. (In Russian)
41. Lazarev E.M., Aksenov K.A. Creation intellectual program agents for town planning conflicts (infringements) search. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technologies]. 2012, no. 2, pp. 41–44. (In Russian)
42. Alexander R., Kelly T. Supporting systems of systems hazard analysis using multi-agent simulation. *Safety Science*, 2013, no. 51, pp. 302–318.

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 05.12.2017 г.

The article was received 05 December 2017



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

© М.В. Андреев¹, Н.Ю. Рубан², А.А. Суворов³

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр-кт Ленина, 30.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В данной работе изучен вопрос влияния конкретных видов преобразователей и фильтров в составе измерительной части на функционирование совокупной математической модели цифровой дифференциальной защиты трансформатора. **МЕТОДЫ.** Для разработки математических моделей защиты использовался метод направленных графов, а для их формализации в виде программного кода – язык программирования Си. В качестве платформы для интеграции созданных моделей и кодов использовался программный комплекс MATLAB Simulink. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Представленные результаты демонстрируют функционирование отдельных элементов математической модели цифровой дифференциальной защиты трансформатора и их влияние на работу защиты в целом. Выявлены некоторые особенности MATLAB Simulink, которые необходимо иметь в виду при реализации математических моделей в данном комплексе. **ВЫВОДЫ.** Показано, что для полного и достоверного моделирования цифровой релейной защиты необходимо не просто воспроизводить функции структурных элементов, а иметь представление, как минимум, об их видах и характеристиках. В противном случае адекватность математической модели будет низкой. Известная проблема численных методов для решения жестких систем дифференциальных уравнений имеет место даже для таких небольших по математическим меркам моделей, как математические модели релейной защиты.

Ключевые слова: цифровая релейная защита, математическое моделирование, MATLAB Simulink, S-Function Builder, численные методы, измерительная часть.

Формат цитирования: Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А. Математическое моделирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора в среде Matlab Simulink // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 134–150. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-134-150

MATHEMATICAL SIMULATION OF NUMERICAL TRANSFORMER DIFFERENTIAL PROTECTION IN MATLAB SIMULINK

M.V. Andreev, N.Yu. Ruban, A.A. Suvorov

National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenina pr., Tomsk 634050, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The paper studies the influence of specific types of converters and filters in the measuring part on the operation of the mathematical model of numerical transformer differential protection. **METHODS.** The method of oriented graphs is used for the development of mathematical models of protection, which are formalized in the form of programming codes using the C programming language. The MATLAB Simulink software complex is used as a platform for created models and codes integration. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The presented results demonstrate the operation of the specific elements of the mathematical model of the numerical transformer differential protection and their effect on the operation of protection as a whole. Some features of MATLAB Simulink have been revealed which must be taken into account when implementing mathematical models in this complex. **CONCLUSIONS.** It is shown that complete and reliable modeling of numerical relay protection requires rather to have an idea on structural element types and characteristics than to reproduce their functions. Otherwise, the adequacy of the mathematical model will be low. The known

¹Андреев Михаил Владимирович, кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Моделирование электроэнергетических систем» кафедры электроэнергетических систем, e-mail: andreevmv@tpu.ru

Mikhail V. Andreev, Candidate of technical sciences, Head of the Scientific Research Laboratory of Electrical Power System Simulation, e-mail: andreevmv@tpu.ru

²Рубан Николай Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, e-mail: rubanny@tpu.ru

Nikolai Yu. Ruban, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Power Systems, e-mail: rubanny@tpu.ru

³Суворов Алексей Александрович, ассистент кафедры электроэнергетических систем, e-mail: suvorovaa@tpu.ru
Aleksei A. Suvorov, Assistant Professor of the Department of Electric Power Systems, e-mail: suvorovaa@tpu.ru



problem of the numerical methods for solving the stiff systems of differential equations is relevant even for such small (in mathematical terms) models as mathematical models of relay protection.

Keywords: numerical relay protection, mathematical simulation, MATLAB Simulink, S-Function Builder, numerical methods, measuring part

For citation: Andreev M.V., Ruban N.Yu., Suvorov A.A. Mathematical simulation of numerical transformer differential protection in MATLAB SIMULINK. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 134–150. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-134-150

Введение

Известно, что математическое моделирование является единственным общедоступным способом получения информации по всему спектру процессов в конкретном оборудовании, включая устройства релейной защиты (РЗ) и автоматики, и электроэнергетических системах (ЭЭС) в целом. С появлением и развитием различных средств моделирования множество задач, решение которых ранее было затруднено, становится актуальным. Одна из них – разработка новых методов и средств настройки устройств РЗ, учитывающих современное состояние и перспективы развития ЭЭС. Вывод о такой необходимости сформулирован на основе детального анализа существующих руководящих указаний по расчету уставок РЗ и применяемых для этого вычислительных комплексов (подробности отражены, например, в [1]).

Удовлетворительное решение обозначенной задачи невозможно без детального анализа работы устройств РЗ различных исполнений в конкретных режимах работы и изучения процессов изменения токов и напряжений в защищаемых объектах, измерительных трансформаторах тока (ИТТ) и напряжения (ИТН) и самих РЗ. Получаемая в результате этого информация позволяет формировать параметры адекватной реальным условиям функционирования настройки РЗ.

Обеспечить указанную возможность в совокупности с адекватным симулятором ЭЭС позволяют математические модели РЗ. В публикациях [1, 2] сформулирован подход к разработке детализированных математических моделей РЗ, основное отличие которого от существующих [3–8] заключается в формировании единого математического описания (в виде передаточной

функции (ПФ) и соответствующей системы дифференциальных уравнений) одновременно для всей совокупности элементов, входящих в состав конкретной РЗ: измерительных трансформаторов, промежуточных преобразователей, частотных фильтров, реле и т.д. При этом исключается ошибка при некорректном или неполном учете взаимосвязей конкретного функционального элемента РЗ, поскольку все связи учитываются естественным образом при моделировании схемы целиком.

Постановка проблемы. Очевидным является неизбежный переход в ЭЭС на цифровые системы защиты, в связи с чем логичным является решение указанной ранее проблемы применительно к цифровой РЗ (ЦРЗ). В качестве конкретного объекта исследований выбрана цифровая дифференциальная защита трансформаторов (ЦДЗТ), поскольку ЦДЗТ относится к разряду основных защит и представляет значительный интерес в плане изучения.

Известно, что наибольшие погрешности преобразования входного сигнала формируются в измерительной части (ИЧ) ЦДЗТ, а соответственно адекватность функционирования модели защиты во многом зависит от полноты и достоверности моделирования элементов ИЧ. В работе [2] представлены результаты исследования интегральных частотных характеристик математических моделей ИЧ для различных сочетаний элементов в ее составе: ИТТ, промежуточных трансформаторов тока (ПТТ), аналоговых фильтров низких частот (ФНЧ), показавшее их конкретное влияние на результаты моделирования процессов в ИЧ в целом. В рамках других исследований (например, [9]) продемонстрировано, что для решения даже таких несложных по ма-



тематическим меркам моделей не все численные методы применимы. Использование наиболее простых численных методов (явный метод Эйлера, усовершенствованный (неявный) метод Эйлера) приводило к существенным искажениям выходного сигнала ИЧ, что в свою очередь было связано с постоянным перемагничиванием ИТТ, а соответственно изменением на каждом шаге интегрирования коэффициентов в дифференциальных уравнениях, формирую-

щих модель ИЧ. Применение более совершенного метода (неявный метод Рунге – Кутта 4-ого порядка) позволило в значительной степени снизить указанные искажения.

Проведенные ранее исследования выполнены для отдельных ИЧ. Целью же данной работы являлось изучение функционирования совокупной математической модели ЦДЗТ с учетом выявленных ранее особенностей.

Материалы и методы исследования

Математические модели ЦДЗТ реализованы в программном комплексе MATLAB Simulink. Для решения дифференциальных уравнений, описывающих процессы в ИЧ, использовался неявный метод Рунге – Кутта 4-го порядка. Программы решения, написанные на языке программирования Си, интегрированы в блоки S-Function Builder. Модель ЦДЗТ составлена для случая трехобмоточного трансформатора.

В качестве входного использовался сигнал, отражающий квазиустановившийся ($0 \div 0,2$ с), аварийный ($0,2 \div 0,8$ с) и послеаварийный ($0,8 \div 1$ с) режимы со следующими характеристиками:

1) для нормального и послеаварийного режимов: амплитуда – 0,6 кА (сторона ВН), 0,4 кА (сторона СН), 7,2 кА (сторона НН), частота – 50 Гц;

2) для аварийного режима: постоянная времени затухания переходного процесса – $T_a = 0,1$ с, ударный ток – 10 кА (сторона ВН), 10 кА (сторона СН), 15 кА (сторона НН), установившийся ток КЗ – 1,5 кА (сторона ВН), 1 кА (сторона СН), 9 кА (сторона НН), состав гармоник относительной основной: 2-я – 10%; 3-я – 5%; 4-я – 3%; 5-я – 2%.

Математические модели ЦДЗТ созданы для следующих сочетаний элементов ИЧ:

– ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-го порядка;

– ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-го порядка;

– ИТТ-пассивный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-го порядка;

– ИТТ-пассивный ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-го порядка.

Основой для создания соответствующих ПФ и образующей их системы дифференциальных уравнений являются схема замещения и направленный граф [1, 2].

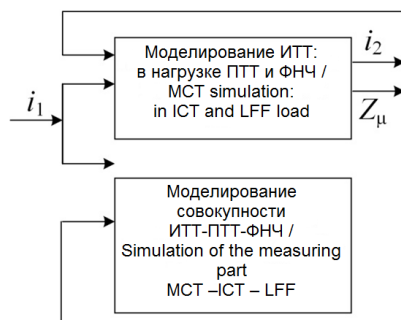
Структура и функции преобразовательной (ПЧ) и вычислительно-логической частей (ВЛЧ) ЦДЗТ полностью совпадают для всех сочетаний. Параметры ИТТ взяты из [10] (коэффициенты трансформации соответственно для ИТТ сторон ВН, СН и НН приняты 600/5, 1000/5, 12000/5 соответственно). Параметры ФНЧ для частоты среза 250 Гц [11] определены в соответствии с методиками, представленными в [12]. В качестве активного ПТТ выбран трансформатор тока LTS 15-NP [13]. Пассивный ПТТ отличается от активного отсутствием операционного усилителя на выходе, замененного резистором с сопротивлением, подобранным таким образом, чтобы обеспечить максимальную близость амплитудно-частотных характеристик активного и пассивного ПТТ.

Схема моделирования совокупности «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» с учетом характеристики намагничивания представлена на рис. 1, а. Особенность данной схемы заключается в параллельном расчете двух математических моделей – ИТТ, нагрузкой которого является ПТТ и ФНЧ, и совокупности «ИТТ-ПТТ-ФНЧ». Первая модель используется для определения тока намагничивания и

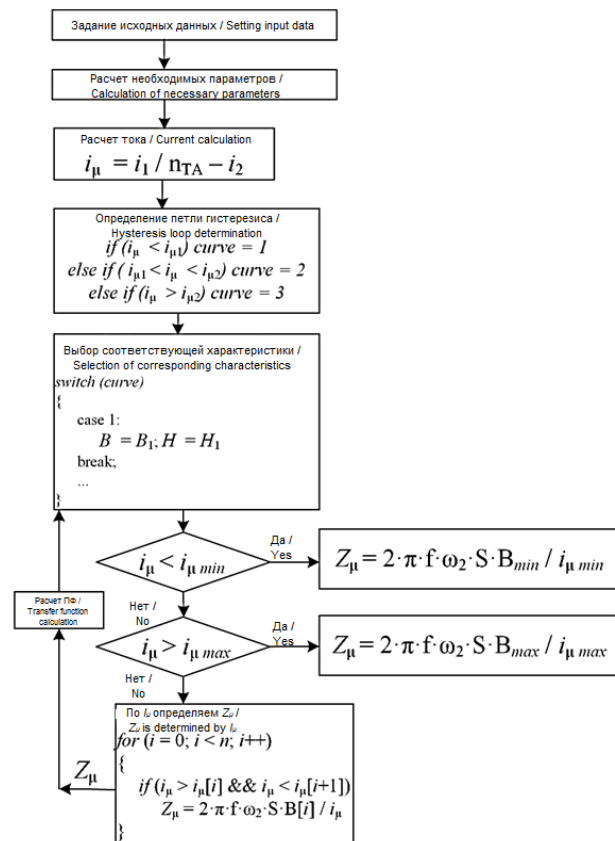
соответственно сопротивления цепи намагничивания в соответствии с характеристикой. Алгоритм реализации характеристики намагничивания с учетом гистерезиса представлен на рис. 1, *b*. Расчет i_μ и на его основе Z_μ осуществлялся по указанному алгоритму на каждом шаге интегрирования. Вторая модель является основной и имеет два входных сигнала – первичный ток i_1 и сопротивление Z_μ , полученное из расчета первой модели. Такая схема необходима, поскольку априори выходным сигналом в любом узле схемы, рассчитываемым с помощью ПФ, является напряжение. Очевидно, что для получения вторичного тока ИТТ, который в свою очередь необходим для реализации алгоритма, представленного на рис. 1, *b*, нужно иметь ток и на входе, и на выходе. Это достигается делением выходного напряжения ИТТ на сопротивление

нагрузки, которое представляет собой ПФ «ПТТ-ФНЧ», составленной при условии тока на входе и напряжения на выходе.

Исходная характеристика намагничивания ИТТ в виде зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B=f(H)$ для стали 3413, заданная таблично и изначально содержащая 90 точек, представлена на рис. 2. Поскольку математическая модель ИЧ основана на схеме замещения [1, 2, 9], то для учета нелинейности использовалась иная форма характеристики намагничивания в виде зависимости сопротивления цепи намагничивания от тока намагничивания $Z_\mu=f(i_\mu)$. С использованием метода кусочно-линейной аппроксимации число точек было увеличено до 46000 для обеспечения плавного изменения сопротивления намагничивания ИТТ.



a



b

Рис. 1. А – схема моделирования совокупности «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» с учетом характеристики намагничивания; б – алгоритм реализации характеристики намагничивания

Fig. 1. A – Simulation flow diagram of the measuring part “MCT – ICT – LFF” (measuring current transformer (MCT), intervening current transformer (ICT), low frequency filter (LFF) taking into account magnetization characteristic; б – algorithm of magnetization characteristic implementation

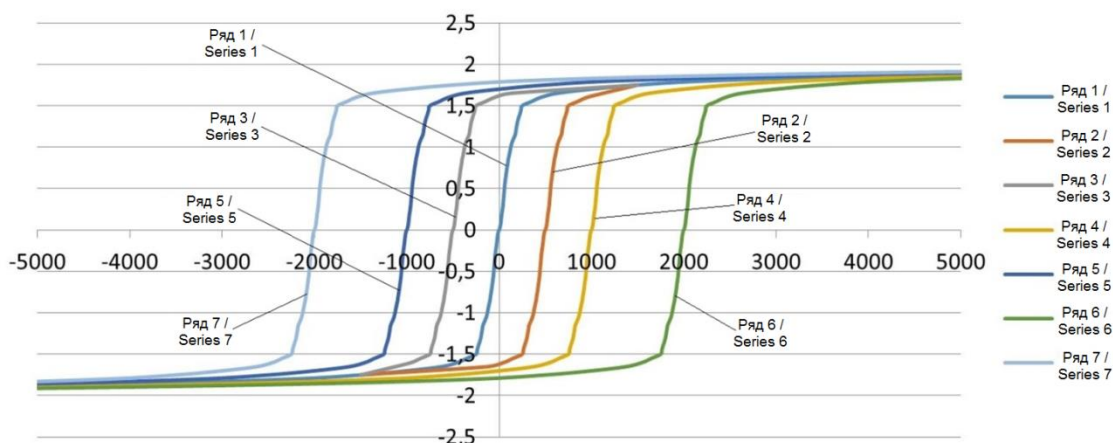


Рис. 2. Семейство петель гистерезиса
Fig. 2. Family of hysteresis loops

Для учета в модели явления гистерезиса были сформированы три петли в результате анализа диапазона изменения тока намагничивания в соответствии с начальной характеристикой и условного деления его на три участка: нормальный режим работы (ряд 2 и ряд 3 на рис. 2), установившееся КЗ без насыщения ИТТ (ряд 4 и ряд 5 на рис. 2), насыщение ИТТ (ряд 6 и ряд 7 на рис. 2 – предельная петля гистерезиса).

Как известно, процесс аналого-цифрового преобразования (АЦП) состоит из двух подпроцессов: дискретизация по времени и квантование по уровню. Частота дискретизации ($1200 \text{ Гц} = 50 \times 24$) рассчитана исходя из значения базовой частоты (50 Гц) и числа выборок АЦП (принято 24) и удовлетворяет требованию теоремы Котельникова.

Алгоритм ЦДЗТ работает с векторными величинами, для формирования которых необходима предварительная цифровая фильтрация с частотой среза, равной базовой частоте – 50 Гц. Для формирования самих векторов использовался метод, отраженный на рис. 3. Первостепенно определяется период T изменения преобразуемого сигнала путем контроля перехода сигнала через ноль сначала в точке 1, а затем в точке n : $T = t_n - t_1$. Для каждой переменной величины рассчитывается среднеквадратичное значение $A_{\text{ск}}$ за период изменения сигнала. Для определения фазы вектора генерируется независимый синхросигнал с частотой 50 Гц. Фаза вектора представляет собой отношение времени от первого перехода через ноль в точке 1 до синхросигнала в точке 2, т.е. времени t_A к времени полного периода T .

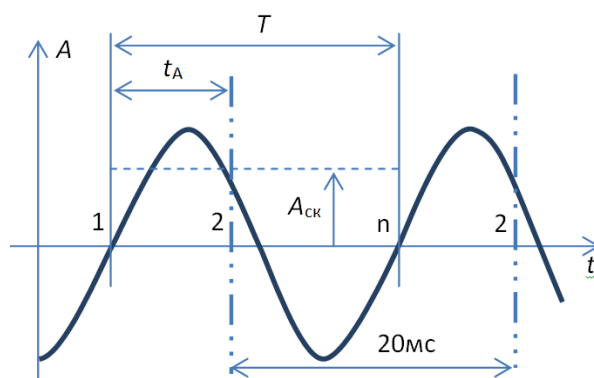


Рис. 3. Формирование амплитуды и фазы вектора
Fig. 3. Calculation of vector amplitude and phase



Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 4 представлены входные сигналы ЦДЗТ для трех сторон трансформатора.

На рис. 5–8 представлены амплитуды и фазы векторов, полученные на основе выходных токов ИЧ для четырех указанных ранее сочетаний. На рисунках можно заметить, что расчет амплитуд и фаз начался не в 0 с, а примерно в 0,045 с, т.е. спустя два периода. По факту расчет векторов начался с первого перехода через 0 кривой тока, что произошло примерно в момент времени 0,005 с. Когда первый период сигнала закончился, сформировалось среднеквадратичное значение амплитуды вектора тока. Однако блок S-Function Builder, рассчитывающий амплитуду и фазу вектора, выдал это значение только в начале нового периода, что дало смещение 0,02 с. Для расчета фазы нужно иметь две метки времени, поэтому сдвиг происходит дважды по одной и той же причине – задержка блока S-Function Builder. Для синхронизации кривых фазы и амплитуды значение амплитуды вектора сдвинуто искусственно на 0,02 с вперед, что связано с отсутствием возможности при моделировании в MATLAB Simulink сдвига сигнала назад во времени. Если данную синхронизацию не провести, то заведомо появится ошибка при расчете дифференциального и тормозного токов с использованием указанных векторов в реагирующем органе ЦДЗТ. Следует отметить, что при программной реализации не в MATLAB от этого эффекта можно избавиться, обратившись к конкретным членам массива данных, чего не получается сделать при работе с блоками S-Function Builder. На рис. 9 показано то, как формируется амплитуда и фаза вектора.

Неодновременность формирования амплитуд и фаз векторов токов с разных сторон силового трансформатора связана с неодинаковым сдвигом по фазе кривых токов после преобразования входного сигнала

ла в измерительной части.

Следует отметить, что корректировки сигналов не производилось, потому что входные сигналы были подобраны так, чтобы идеально компенсировать друг друга, и, соответственно, необходимость корректировки априори исключалась.

Проводилось вычисление:

– дифференциального тока:

$$I_d = |I_{A\ BH} + I_{A\ CH} + I_{A\ HH}|;$$

– тормозного тока:

$$I_s = |I_{A\ BH}| + |I_{A\ CH}| + |I_{A\ HH}|.$$

Сформированные дифференциальный и тормозной токи представлены на рис. 10 и 11.

Из рис. 10, 11 видно, что различные варианты ИЧ совершенно по-разному влияют на результаты моделирования выходного сигнала. В предыдущих работах, например в [2], обращено внимание на существенное различие интегральных частотных характеристик ИЧ. Графики, представленные на рис. 10, 11, визуально подтверждают то, как это различие сказывается на формировании контрольных токов реагирующего органа ЦДЗТ. Рис. 12 показывает сформированные в итоге из этих токов аварийные характеристики $I_{\text{диф}} = f(I_{\text{торм}})$ для каждого из указанных ранее сочетаний элементов ИЧ. Расчет характеристики срабатывания (ХС) ЦДЗТ сделан на основе руководящих указаний Siemens для SIPROTEC 7UT6 [14, 15]. Результаты сведены в таблицу.

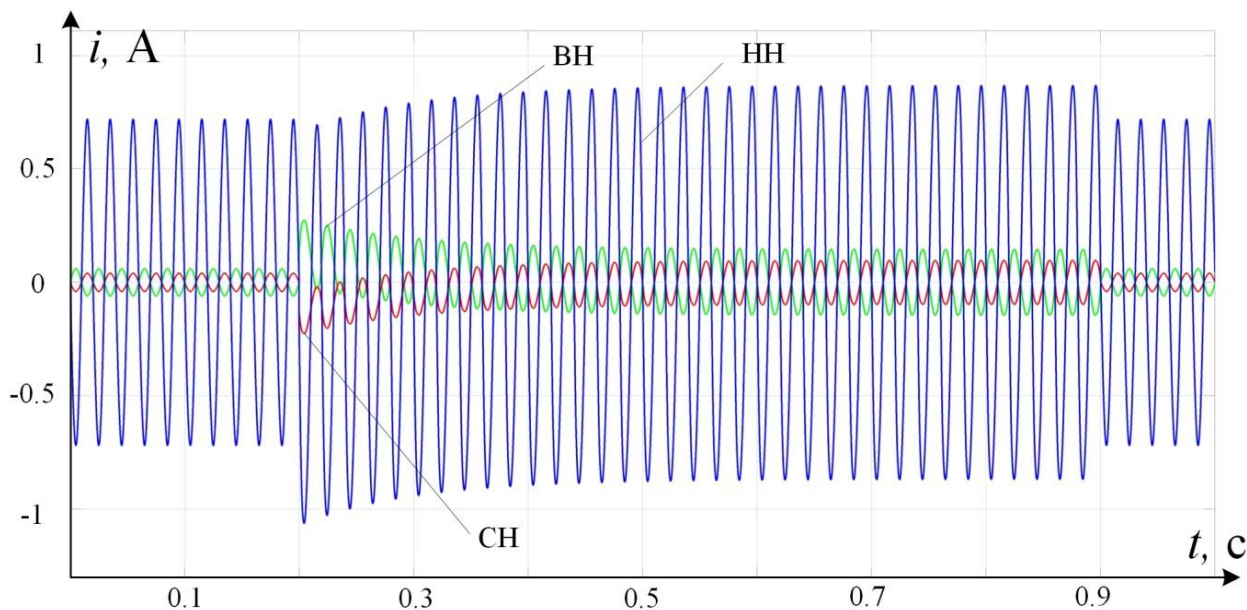


Рис. 4. Сигналы на входе ЦДЗТ
Fig. 4. Input signals of numerical transformer differential protection

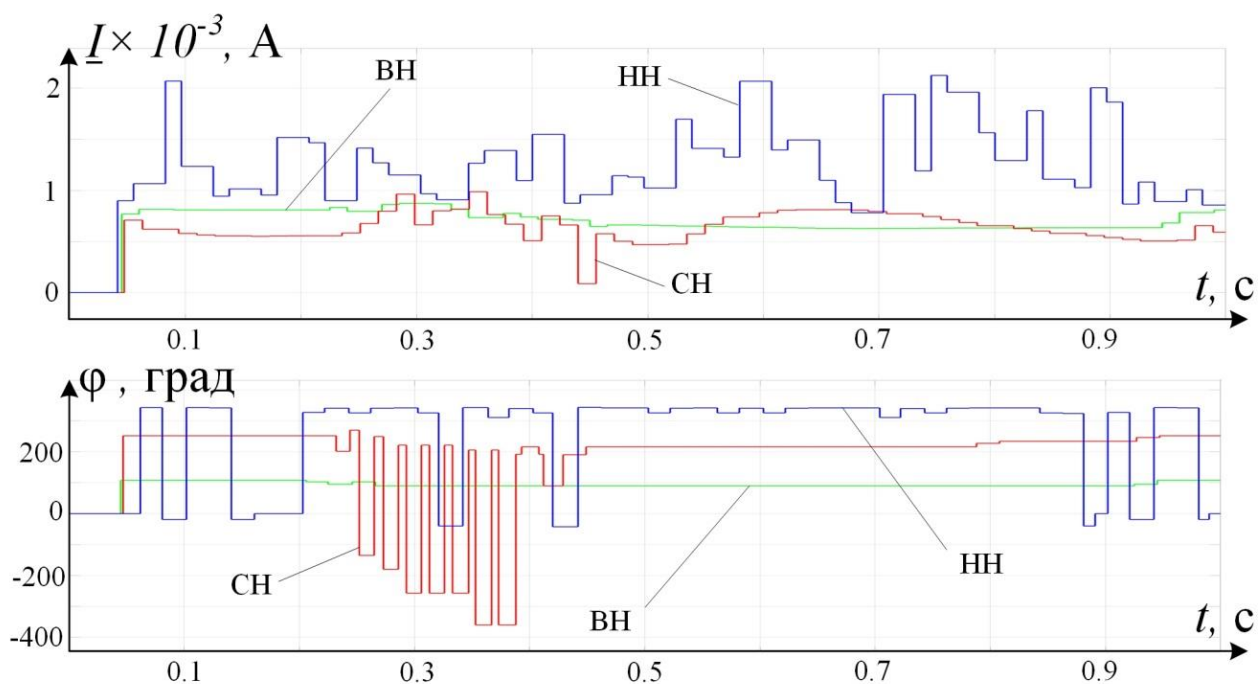


Рис. 5. Амплитуды и фазы векторов на основе выходных токов ИЧ
«ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-его порядка»
Fig. 5. Amplitudes and phases of vectors based on output currents of the measuring part
“MCT-active ICT-Butterworth 3rd-order LFF”

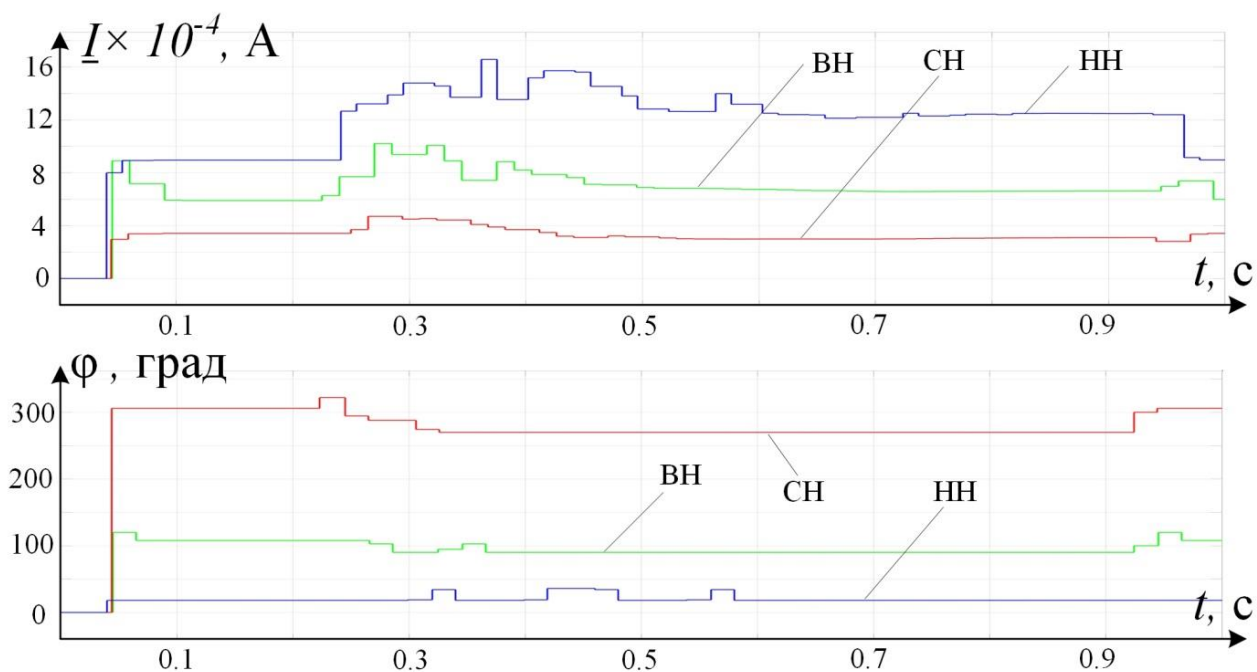


Рис. 6. Амплитуды векторов на основе выходных токов ИЧ
«ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-его порядка»
Fig. 6. Amplitudes of vectors based on output currents of the measuring part
“MCT- active ICT-Chebyshev 3rd-order LFF”

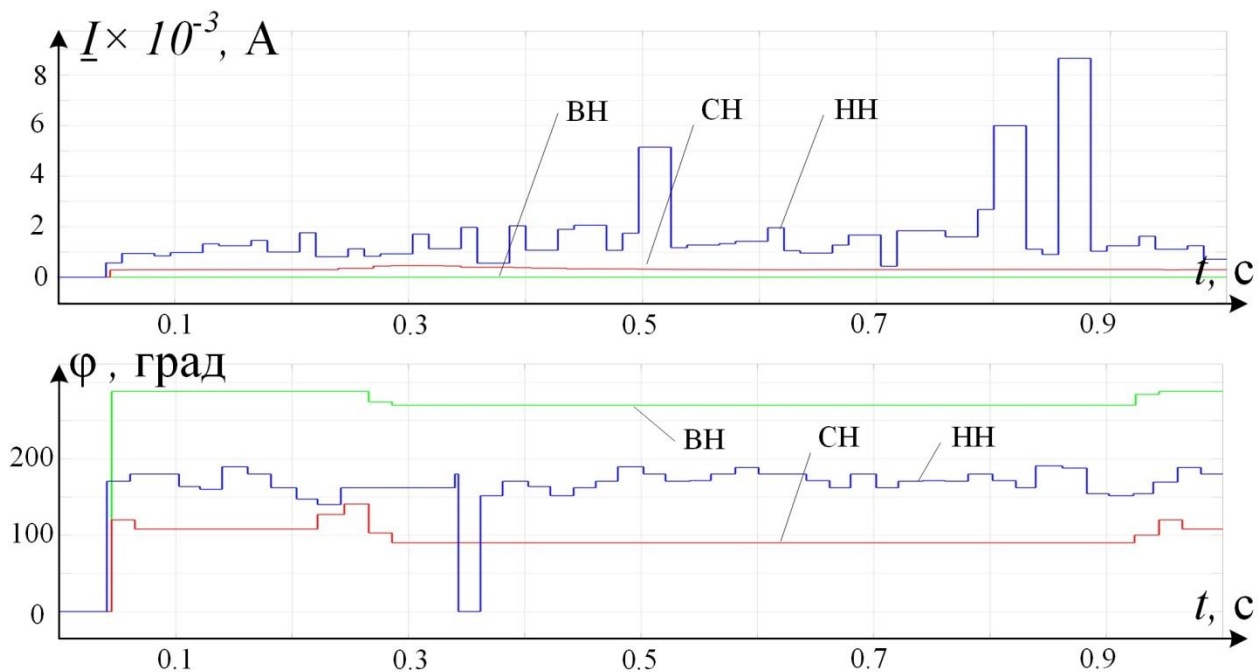


Рис. 7. Амплитуды векторов на основе выходных токов ИЧ
«ИТТ-пассивный ПТТ-ФНЧ Баттлерворта 3-его порядка»
Fig. 7. Amplitudes of vectors based on output currents of the measuring part
“MCT- passive ICT-Butterworth 3rd-order LFF”

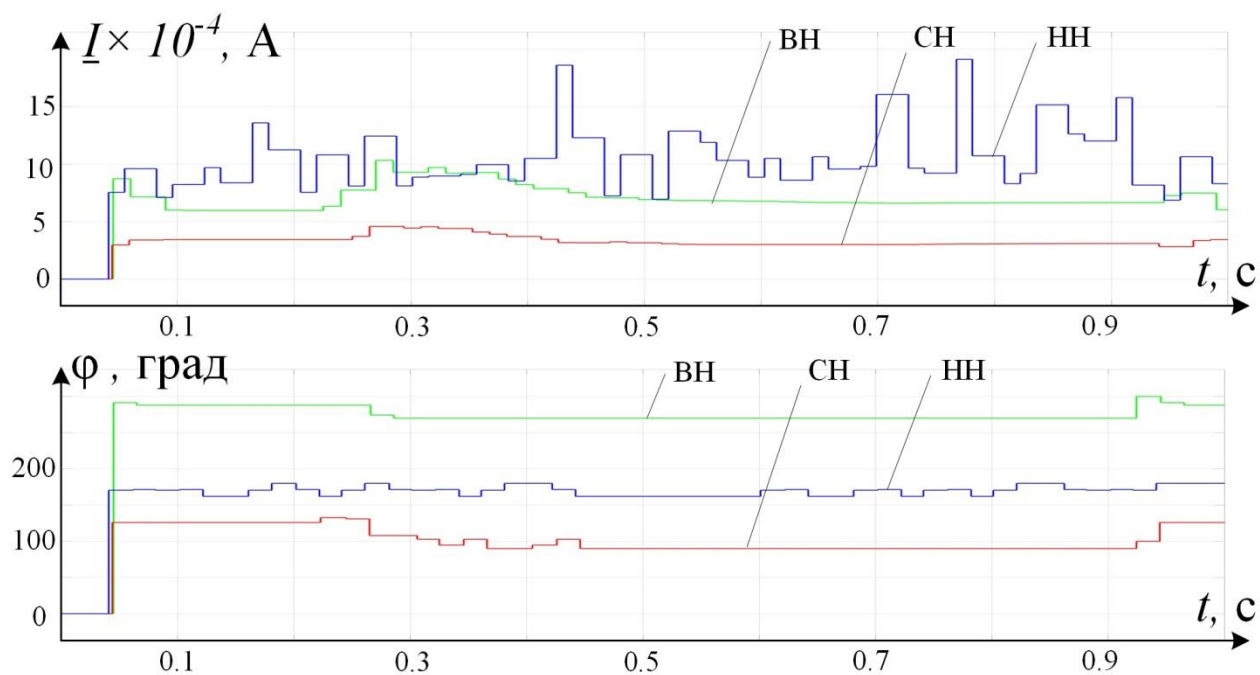


Рис. 8. Амплитуды векторов на основе выходных токов ИЧ
«ИТТ-пассивный ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-его порядка»
Fig. 8. Amplitudes of vectors based on output currents of the measuring part
“MCT-passive ICT-Chebyshev 3rd-order LFF”

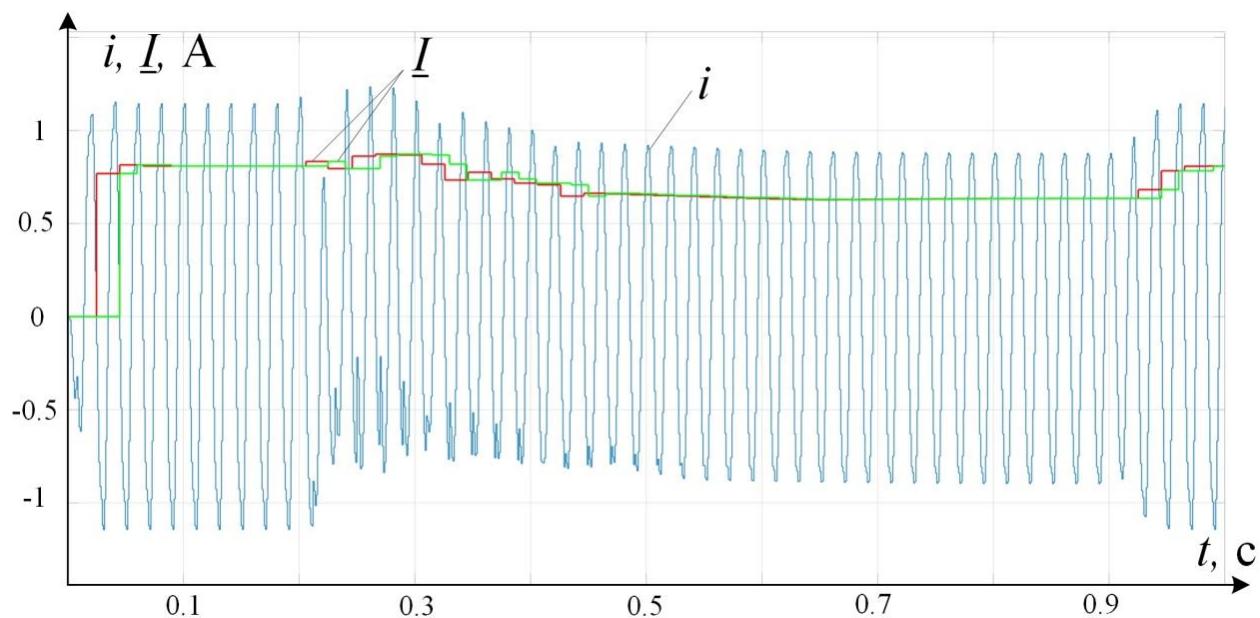


Рис. 9. Формирование амплитуды и фазы вектора в S-Function Builder ИЧ
«ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттлерворта 3-его порядка»
Fig. 9. Formation of vector amplitude and phase in S-Function Builder of the measuring part
“MCT-active ICT-Butterworth 3rd-order LFF”

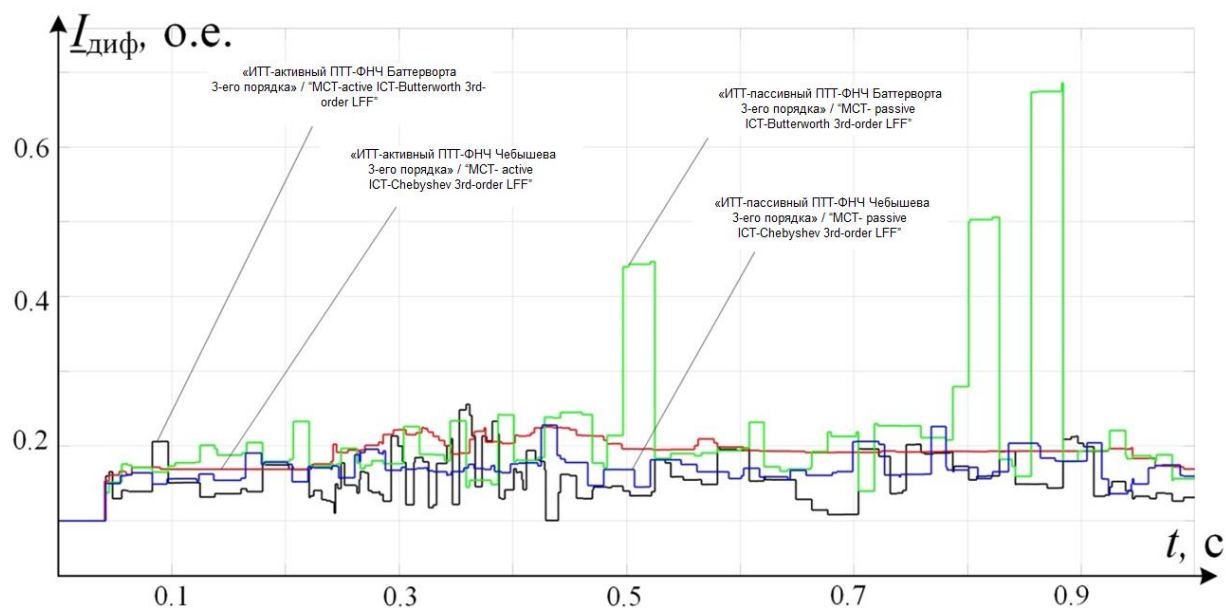


Рис. 10. Дифференциальные токи для различных сочетаний ИЧ
Fig. 10. Differential currents for different types of measuring part combination

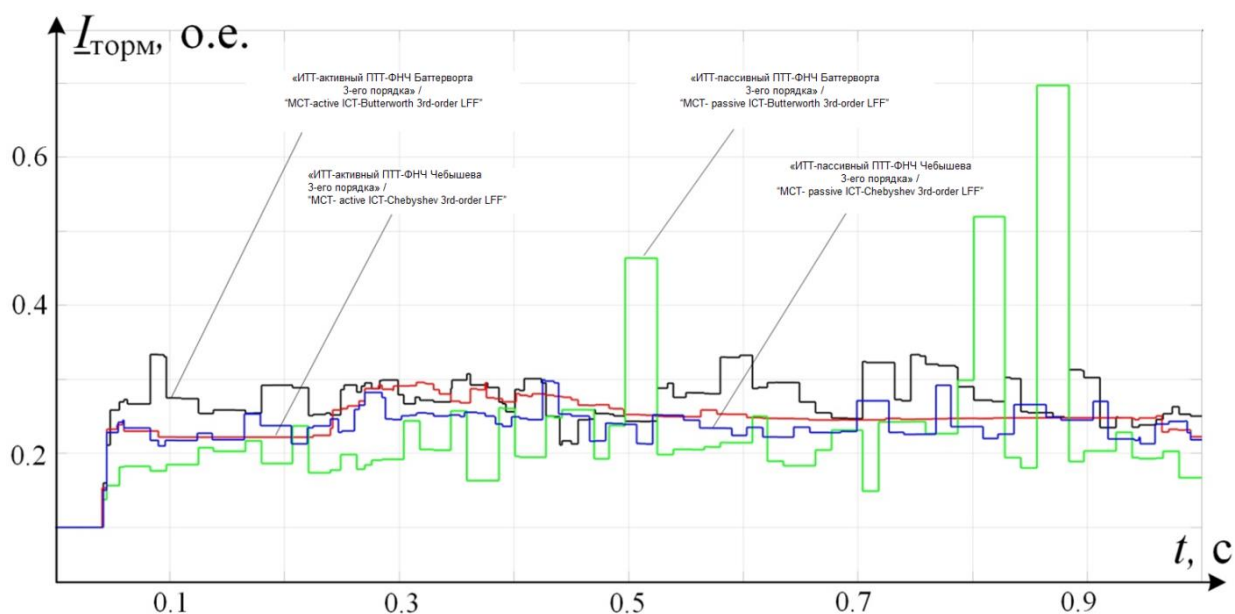


Рис. 11. Тормозные токи для различных сочетаний ИЧ
Fig. 11. Restraint currents for different combinations of the measuring part

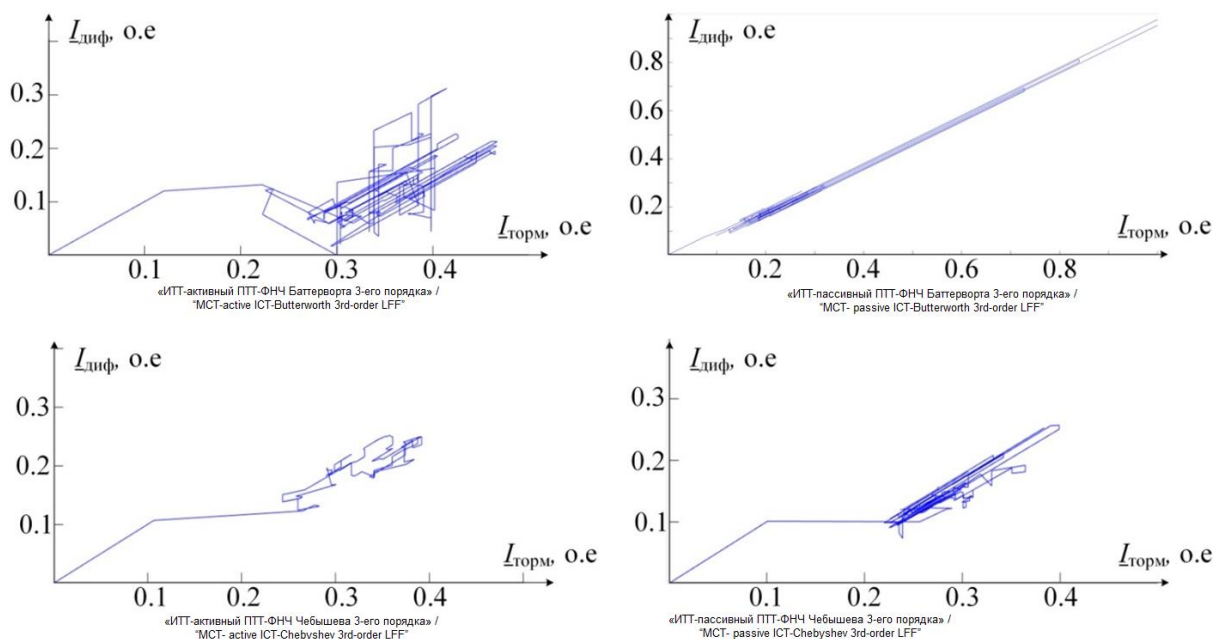


Рис. 12. Аварийные характеристики, зафиксированные реагирующими органами ЦДЗТ с названными ранее ИЧ

Fig. 12. Fault characteristics measured by the tripping elements of numerical transformer differential protection with the measuring part named earlier

Уставки ЦДЗТ

Settings of numerical transformer differential protection

Параметр / Parameter	Значение / Value
Ток срабатывания / Tripping current ($I_{уст}$), о.е.	0,2
Ток срабатывания дифференциальной отсечки / Tripping current of a differential cutoff ($I_{уст до}$), о.е.	7,5
Основание первой ветви характеристики срабатывания / Base of the first branch of the tripping characteristic (I_{xc1}), о.е.	0
Наклон первой ветви характеристики срабатывания / Slope of the first branch of the tripping characteristic (K_{xc1}), о.е.	0,25
Основание второй ветви характеристики срабатывания / Base of the second branch of the tripping characteristic (I_{xc2}), о.е.	2,5
Наклон второй ветви характеристики срабатывания / Slope of the second branch of the tripping characteristic (K_{xc2}), о.е.	0,5
Начало зоны дополнительного торможения / Start of the additional stabilization zone ($I_{доп}$), о.е.	5
Наклон ветки, определяющей зону дополнительного торможения / Slope of the branch determining the additional stabilization zone ($K_{доп}$), о.е.	0,15
Доля второй гармоники / Percentage of the second harmonic (I_2), %	15
Доля третьей (пятой) гармоник / Percentage of the third (fifth) harmonic (I_3 (I_5)), %	20

Вид ХС представлен на рис. 13. К сожалению, возможности блока XYplot из библиотеки MATLAB Simulink не позволяют

завести на него несколько сигналов, поэтому зона дополнительного торможения ХС вынесена отдельно.

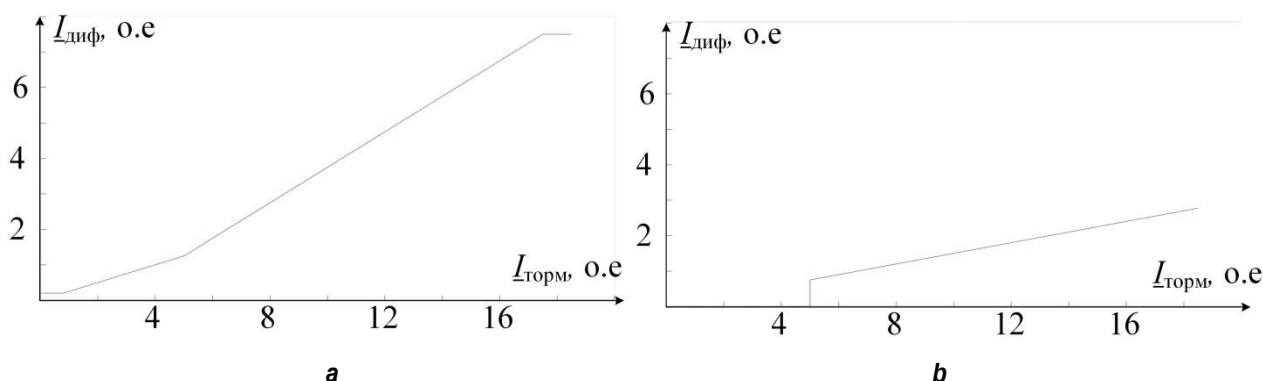


Рис. 13. Характеристика срабатывания ЦДЗТ: а – основная характеристика;
b – зона дополнительного торможения
Fig. 13. Tripping characteristic of numerical transformer differential protection:
a – main characteristic; b – additional stabilization zone

На рис. 14 представлены сигналы, сформированные реагирующими органами ЦДЗТ для каждого из указанных ранее сочетаний элементов ИЧ.

Как видно на рис. 14, не все реагирующие органы сформировали сигналы на срабатывание – не сработал вариант с ИЧ «ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-го порядка». Время выдачи команды на срабатывание у остальных сильно различается. Отчасти это связано с различием формируемых аварийных характеристик,

отчасти – с работой блока, реализующего блокировку по гармоническим составляющим, основанного на алгоритме быстрого преобразования Фурье, который наиболее часто применяется в ЦРЗ. Функционирование блока для случая ИЧ «ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-го порядка» отображено на рис. 15. Для сравнения на рис. 16 представлена работа аналогичного блока, составленного с использованием элемента Fourier из библиотеки MATLAB Simulink.

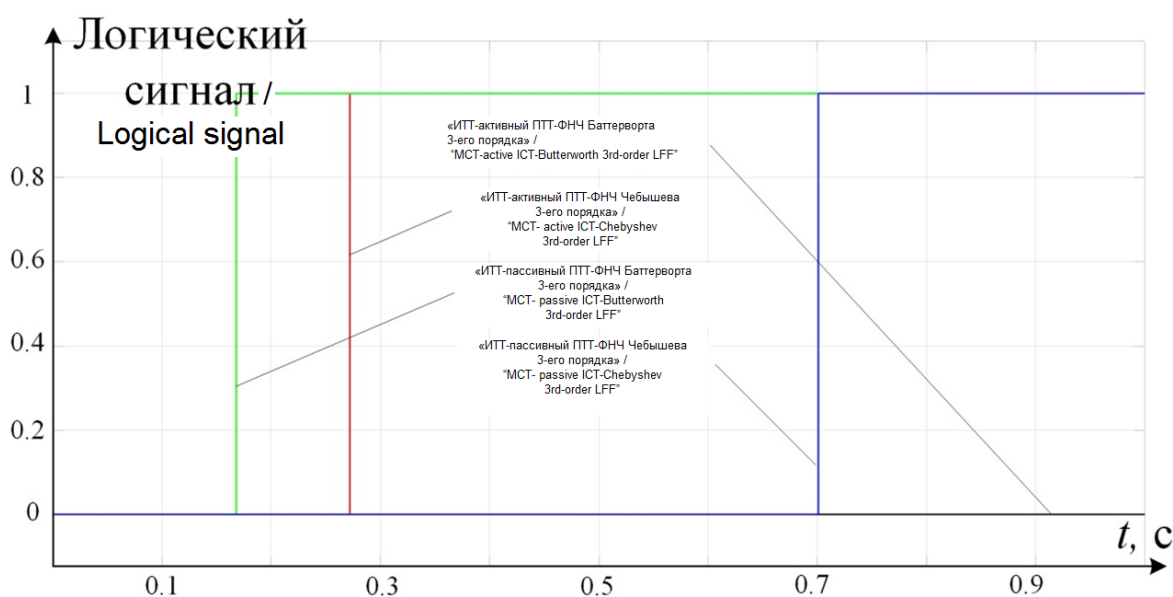


Рис. 14. Сигнал о срабатывании (логическая 1) / несрабатывании (логический 0)
ЦДЗТ для различных сочетаний ИЧ
Fig. 14. Tripping (logical 1) / non-tripping (logical 0) signal of numerical transformer differential protection
for different combinations of the measuring part

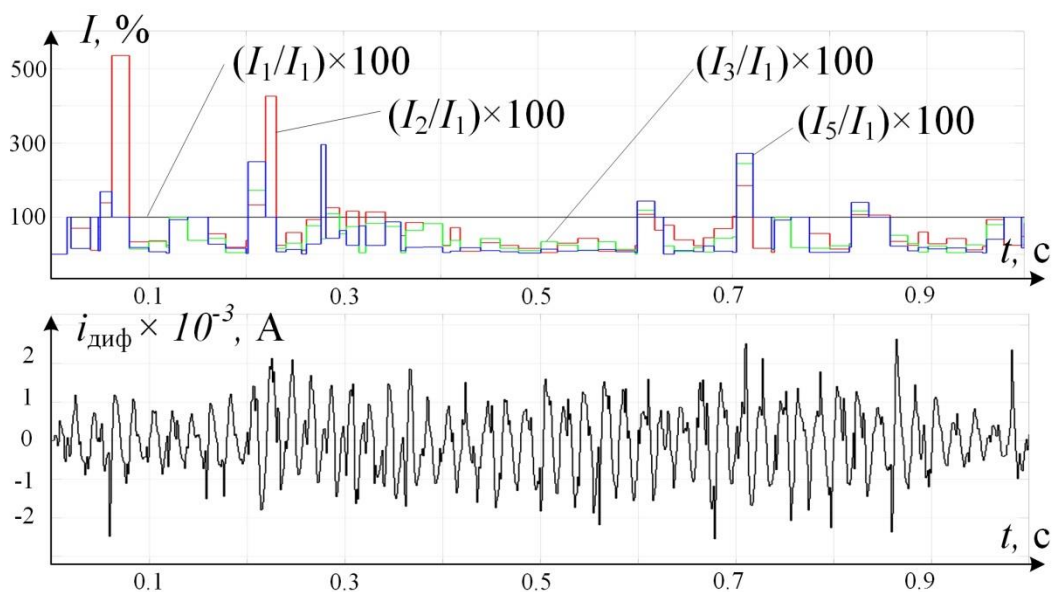


Рис. 15. Доли гармонических составляющих относительно основной гармоники (сверху) на основе мгновенных значений дифференциального тока (снизу)
Fig. 15. Percentage of harmonic components relative to the fundamental harmonic (at the top) on the basis of the instantaneous values of the differential current (at the bottom)

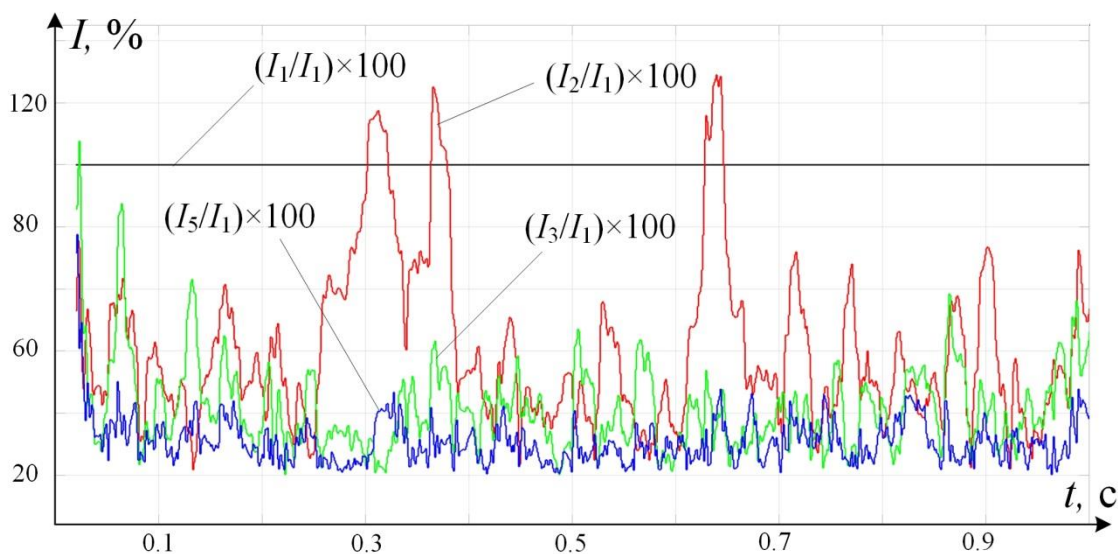


Рис. 16. Доли гармонических составляющих, полученные с помощью блока Fourier, относительно основной гармоники
Fig. 16. Percentage of harmonic components obtained by means of the Fourier block relative to the fundamental harmonic

Как видно из рис. 15, доли второй, третьей и пятой гармонических составляющих, полученные относительно первой гармоники и рассчитанные на основе кривой дифференциального тока, значительно превышают уставки в 15, 20 и 20% соответственно. Это приводит к блокировке срабатывания ЦДЗТ. Аналогичная ситуация сло-

жилась и при использовании стандартного блока быстрого преобразования Фурье Fourier из библиотеки MATLAB Simulink. Получившаяся форма дифференциального тока объясняется следующими основными факторами: 1) сохранившимися искажениями формы выходного тока ИЧ вследствие численного интегрирования дифференци-

альных уравнений; 2) нелинейностью ИТТ в целом и существенным различием магнитных характеристик ИТТ с разных сторон силового трансформатора. Если второй фактор ожидаем и не является проблемой моделирования, то первый связан с вопросом применимости численных методов [16–18]. Авторами настоящей статьи предложен вариант решения данной проблемы, указанный, например, в [9], заключающийся в использовании метода неявного интегрирования аналоговым способом системы дифференциальных уравнений, образующих модель РЗ. В настоящее время этот вариант уже взят в разработку. Различие в работе созданного блока вычисления гармоник и стандартного блока MATLAB Simulink становится понятным после рассмотрения последнего «под маской» (рис. 17).

В созданном блоке расчет гармоник осуществляется один раз в период, который определяется, как показано на рис. 3. Задержка в вычислении связана с особенностями MATLAB Simulink, отмеченными ранее при описании блока формирования векторов. Данный метод также работает с первого перехода сигнала через ноль. В библиотечном блоке, как видно из рис. 17, сначала мгновенные значения входного сигнала перемножаются с искусственно

сформированными кривыми, изменяющимися по закону синуса ($\sin(wt)$) и косинуса ($\cos(wt)$), для формирования в дальнейшем амплитуды и фазы вектора (или действительной и мнимой частей в случае записи вектора в комплексной форме). Блок Mean осуществляет вычисление среднего арифметического за период, поэтому при использовании Fourier вначале априори будет появляться пауза, равная периоду, обратно пропорциональному частоте основной гармонике. Вычислив количество точек за заданный период (поскольку сигнал дискретный), далее по ходу изменения сигнала блок Mean осуществляет пересчет среднего арифметического исходя из полученного фиксированного числа точек. По мнению авторов настоящей статьи, этот подход не совсем корректен, поскольку при большой доле высокочастотных составляющих возможны частые переходы через ноль и, соответственно, отличие фактического периода изменения сигнала от рассчитанного на первом этапе. Написанный программный код, реализующий алгоритм быстрого преобразования Фурье, каждый раз заново рассчитывает период сигнала и определяет на нем доли гармонических составляющих, а значит, указанный недостаток исключен.

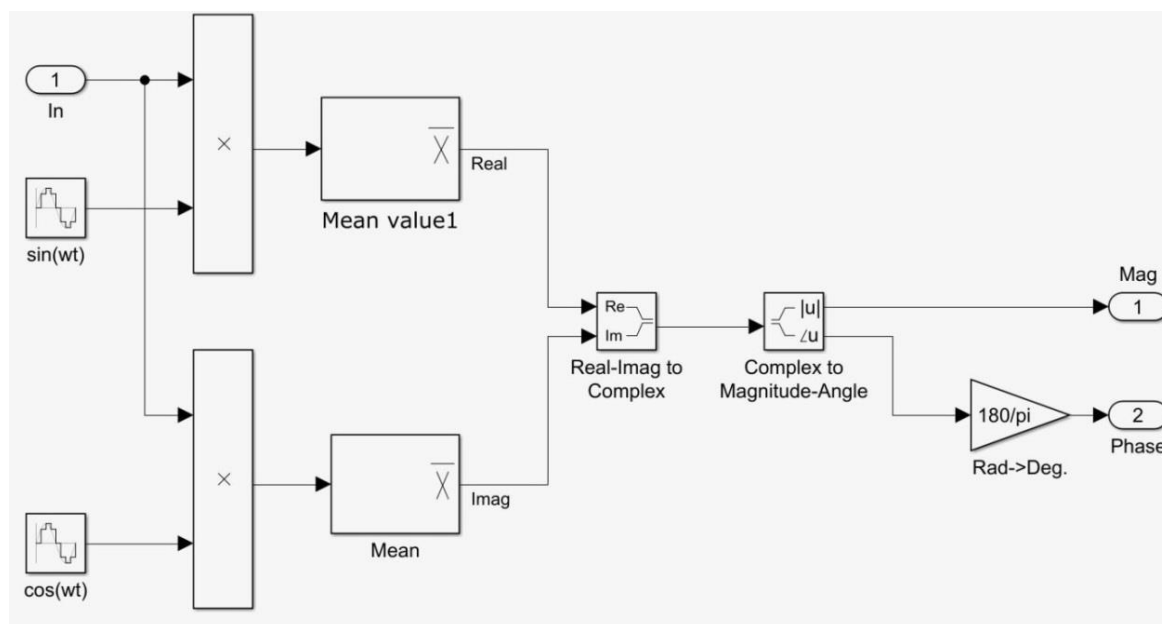


Рис. 17. Блок Fourier «под маской»
Fig. 17. Fourier block “under mask”



Выводы

1. Ранее проведенные исследования [2, 9] позволили определить конкретное влияние отдельных элементов (ИТТ, ПТТ и ФНЧ) на результаты моделирования ИЧ в целом. Тем не менее требовало проверки предположение о том, что их влияние в зависимости от конкретного вида ПТТ и ФНЧ по-разному скажется на функционировании защиты в целом. Проведенные и представленные в данной статье исследования это доказали. Таким образом, для достаточно полного и достоверного моделирования ЦРЗ необходимо не просто воспроизводить функции структурных элементов, как это часто делается [5, 7, 8], а знать хотя бы их вид.

2. Проблема применимости численных методов [16–18] имеет место для решения таких небольших (по математическим меркам) математических моделей. Это подтверждается возникающими искажениями моделируемых сигналов, даже при использовании такого достаточно устойчивого метода, как неявный метод Рунге – Кутты 4-го порядка. Данное явление связано с частыми (на каждом шаге интегрирования) и иногда значительными (при КЗ) изменениями сопротивления цепи намагничивания ИТТ. Учет гистерезиса еще больше усугубляет ситуацию. Кусочно-линейная аппроксимация петель гистерезиса

позволяет несколько сгладить искажения сигнала, но главным образом в установленном режиме, когда ток намагничивания изменяется плавно. Предположительно эту проблему можно снять при неявном интегрировании аналоговым способом, что является задачей планируемых исследований.

3. Выявлены некоторые особенности MATLAB Simulink, которые необходимо учитывать при моделировании ЦРЗ: задержки, возникающие при использовании программируемых блоков; невозможность сдвига сигнала назад во времени (по факту входные и выходные сигналы S-Function Builder – это массивы данных, но обратиться к конкретному члену этого массива и задать его невозможно), что также создает видимость задержек в работе модели; несовершенство некоторых библиотечных элементов, которые необходимы для моделирования ЦРЗ. Тем не менее MATLAB Simulink позволил выполнить запланированные исследования и определить конкретные требования к математическим моделям ЦРЗ и средствам их реализации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60043 мол_а_дк.

Библиографический список

1. Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Гордиенко И.С., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Всережимное математическое моделирование релейной защиты электроэнергетических систем. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. 180 с.
2. Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Рубан Н.Ю., Суворов А.А., Сулайманов А.О., Уфа Р.А. Влияние элементов измерительной части цифровой дифференциальной защиты трансформаторов на преобразование входного сигнала // Проблемы региональной энергетики. 2017. № 2 (34). С. 1–12.
3. Ершов Ю.А., Малеев А.В. Моделирование микропроцессорных релейных защит в среде MATLAB // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2010. Т. 3. № 2. С. 220–228.
4. Румянцев Ю.В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59. № 3. С. 203–224.
5. Ершов Ю.А., Киселев Д.Н. Исследование цифровых дифференциальных защит трансформаторов // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016. № 34-1. С. 176–185.
6. Chen C.-S., Liu C.-W., Jiang J.-A. Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21. No. 2. P. 619–626.
7. Perez S.G.A., Sachdev M.S., Sidhu T.S. Modeling



relays for use in power system protection studies // Proc. Electrical and Computer Engineering Conf. 2005. P. 566–569.

8. Aktaibi A., Rahman M.A. MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications. Vol. 1. Chapter 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/48624>

9. Андреев М.В. Особенности математического моделирования цифровых устройств релейной защиты // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2017. № 11 (100). С. 10–15.

10. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Жалалис Л.В. и др. Трансформаторы тока. Л.: Энергия, 1980. 344 с.

11. Овчаренко Н.И. Цифровые аппаратные и программные элементы микропроцессорной релейной защиты и автоматики энергосистем. Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 5-6 (89-90). М.: НТФ «Энергопрогресс», 2006. 120 с.

12. Johnson D., Johnson J., Moore H. A handbook of active filters, Englewood Cliffs. New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc. 1980. 128 p.

13. Овчаренко Н.И. Аналоговые элементы микропроцессорных комплексов релейной защиты и автоматики. Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 9 (33). М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 80 с.

14. Manual for Differential Protection 7UT6x V4.6, Siemens, 2014.

15. Instruction Manual for Numerical Differential Protection Relay for Transformers, Generators, Motors and Branches Points 7UT51 V3.0, Siemens, 2001.

16. Hall G., Watt J.M. Modern numerical methods for ordinary differential equations. Oxford, UK: Clarendon Press, 1976. 312 p.

17. Галанин М.П., Ходжаева С.Р. Методы решения жестких обыкновенных дифференциальных уравнений. Результаты тестовых расчетов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 98. 29 с.

18. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). М.: Высш. шк. 2001. 382 с.

References

1. Andreev M.V., Ruban N.Yu., Gordienko I.S., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Sulaimanov A.O. *Vse-rezhimnoe matematicheskoe modelirovanie releinoi zashchity elektroenergeticheskikh sistem* [All-regimes simulation of relay protection in electrical power systems]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2016, 180 p. (In Russian)

2. Andreev M.V., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Ruban N.Yu., Suvorov A.A., Sulaimanov A.O., Ufa R.A. Impact of Measuring Part Elements of Transformer Differential Protection on Input Signal Processing. *Problemy regional'noi energetiki* [Problems of the regional energetics]. 2017, no. 2 (34), pp. 1–12. (In Russian)

3. Ershov Yu.A., Maleev A.V. Microprocessor relay protection modeling in MATLAB. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Series "Engineering and Technologies"]. 2010, vol. 3, no. 2, pp. 220–228. (In Russian)

4. Rumyantsev Yu.V. A comprehensive model for the power transformer digital differential protection functioning research. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. 2016, vol. 59, no. 3, pp. 203–224 (In Russian)

5. Ershov Yu.A., Kiselev D.N. Study of numerical transformer differential protection. *Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike* [Priority research areas: from theory to practice]. 2016, no. 34-1, pp. 176–185. (In Russian)

6. Chen C.-S., Liu C.-W., Jiang J.-A. Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection. *IEEE Transactions on power delivery*. 2006, vol. 21, no. 2, pp. 619–626.

7. Perez S.G.A., Sachdev M.S., Sidhu T.S. Modeling relays for use in power system protection studies. *Proc. Electrical and Computer Engineering Conf.* 2005, pp. 566–569.

8. Aktaibi A., Rahman M.A. MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications. Vol. 1. Chapter 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/48624>

9. Andreev M.V. Features of mathematical modeling of digital relay protection devices. *Avtomatizatsiya i IT v energetike* [Automation and IT in power engineering]. 2017, no. 11 (100), pp. 10–15. (In Russian)

10. Afanas'ev V.V., Adon'ev N.M., Zhalalis L.V. i dr. *Transformatory toka* [Current transformers]. Leningrad: Energiya Publ., 1980, 344 p. (In Russian)

11. Ovcharenko N.I. *Tsifrovye apparatnye i programnye elementy mikroprotssessornoi releinoi zashchity i avtomatiki energosistem*. [Digital hardware and software elements of power system microprocessor relay protection and automation]. *Bibliotekha elektrotekhnika, prilozhenie k zhurnal "Energetik"* [Electrical engineer library, supplement to the journal "Power Engineer"]. Issue 5-6 (89-90). Moscow: NTF «Energoprogress» Publ., 2006, 120 p. (In Russian)

12. Johnson D., Johnson J., Moore H. A handbook of active filters, Englewood Cliffs. New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc. 1980, 128 p.

13. Ovcharenko N.I. *Analogovye elementy mikroprotssessornykh kompleksov releinoi zashchity i avtomatiki* [Analog elements of microprocessor complexes of relay protection and automation]. *Bibliotekha elektrotekhnika, prilozhenie k zhurnal "Energetik"* [Electrical engineer library, supplement to the journal "Power Engineer"]. Issue 9 (33), Moscow: NTF «Energoprogress» Publ., 2001, 80 p. (In Russian)



14. Manual for Differential Protection 7UT6x V4.6, Siemens, 2014.
15. Instruction Manual for Numerical Differential Protection Relay for Transformers, Generators, Motors and Branches Points 7UT51 V3.0, Siemens, 2001.
16. Hall G., Watt J.M. Modern numerical methods for ordinary differential equations. Oxford, UK: Clarendon Press, 1976, 312 p.
17. Galanin M.P., Khodzhaeva S.R. Methods of solving

stiff ordinary differential equations. Results of test calculations. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha*. [Keldysh Institute preprints]. 2013, no. 98, 29 p. (In Russian)

18. Verzhbitskii V.M. *Chislennyye metody (matematicheskii analiz i obyknovennyye differentsial'nye uravneniya)* [Numerical methods (mathematical analysis and ordinary differential equations)]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001, 382 p. (In Russian)

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 30.11.2017 г.

The article was received 30 November 2017



ПНЕВОТРАНСПОРТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

© А.В. Дмитриев¹, В.Э. Зинуров², О.С. Дмитриева³

^{1,2}Казанский государственный энергетический университет,

Российская Федерация, Республика Татарстан, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

³Нижнекамский химико-технологический институт – филиал ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,

Российская Федерация, Республика Татарстан, 423578, г. Нижнекамск, пр. Строителей, 47.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Разработано пневмотранспортное устройство, способное обеспечить непрерывное и равномерное транспортирование присадки в виде обезвоженного карбонатного шлама из емкости в воздуховод. При проектировании пневмотранспортной установки важной задачей является подбор наиболее оптимальных геометрических размеров элементов установки и ее наиболее рациональных физических параметров: скорости газового потока в линии подачи воздуха, давления на входном и выходном отверстиях, необходимых для эффективной работы пневмотранспортной системы. **МЕТОДЫ.** Исследование было выполнено в гидродинамическом программном модуле SolidWorks Flow Simulation. Численное моделирование осуществлялось решением дифференциальных уравнений движения и неразрывности. Для замыкания системы уравнений использовалась двухпараметрическая k - ε -модель турбулентности. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Представлены результаты компьютерного моделирования и анализа влияния числа выходных отверстий распределительного устройства, являющегося по принципу действия аналогом сопла, на потери давления в пневмотранспортной установке и на эффективность пневмотранспортирования. **ВЫВОДЫ.** Установлено, что для эффективного транспортирования мелкодисперсного материала из емкости, имеющей цилиндрическую форму, необходимо использовать пневмотранспортное устройство с распределительным устройством с четырьмя выходными отверстиями.

Ключевые слова: пневмотранспорт, дозатор, пневмотранспортирование, карбонатный шлам, продукты сгорания.

Формат цитирования: Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С. Пневмотранспортная установка для транспортирования мелкодисперсного материала // Вестник Иркутского государственного университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 151–158. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-151-158

PNEUMATIC CONVEYING INSTALLATION FOR FINELY DIVIDED MATERIAL TRANSPORTATION

A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva

Kazan State Power Engineering University,

51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russian Federation

Nizhnekamsk Chemical Technological Institute – branch of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technological University»,

47 Stroitelei pr., Nizhnekamsk 423578, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. A pneumatic conveying device capable to provide continuous and uniform transportation of the additive in the form of dehydrated carbonaceous slime from the tank into the air duct is developed. When designing a pneumatic conveying installation it is important to choose the most optimum geometrical sizes of the installation elements, the most rational physical parameters including gas flow velocity in the channels of pneumatic conveying installation and pressure at the inlet and outlet openings necessary for efficient operation of the pneumatic conveying system.

METHODS. The research is conducted in the hydrodynamic program module SolidWorks Flow Simulation. Numerical

¹Дмитриев Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, e-mail: ieremiada@gmail.com

Andrei V. Dmitriev, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering, e-mail: ieremiada@gmail.com

²Зинуров Вадим Эдуардович, магистрант, e-mail: vadd_93@mail.ru

Vadim E. Zinurov, Master's Degree student, e-mail: vadd_93@mail.ru

³Дмитриева Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических технологий, e-mail: ja_deva@mail.ru

Oksana S. Dmitrieva, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies, e-mail: ja_deva@mail.ru



model operation is carried out through the solution of differential equations of motion and continuities. A two-parameter $k-\epsilon$ turbulence model is used for the closure of the set of equations. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The article presents the results of computer simulation and the analysis of the influence of the number of outlet openings of the distributing device (which is a nozzle analog by the operation principle) on pressure losses in the pneumatic conveying installation and on pneumatic conveying efficiency. **CONCLUSIONS.** It has been determined that efficient transportation of finely divided material from the cylindrical tank requires the use of the pneumatic conveying installation with a distributing device having 4 outlet openings.

Keywords: pneumatic conveying device, batcher, pneumatic conveying, carbonaceous slime, combustion products

For citation: Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Pneumatic conveying installation for finely divided material transportation. Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 151–158 (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-151-158

Введение

В процессе производства тепла на ТЭЦ при сжигании мазута происходит выброс вредных веществ в атмосферу. В окружающую среду попадают оксиды серы, азота, углерода, ванадия и др., способствующие ухудшению экологической обстановки в области расположения ТЭЦ и разрушению озонового слоя атмосферы, влекущих увеличение заболеваемости населения. В последние годы актуальность данной проблемы возрастает вследствие изменения цен на рынке энергоресурсов: цены на менее токсичные виды топлива по сравнению с мазутом – нефть и газ – поднимаются, а на сложные по составу и принципу действия виды сырья, в данном случае мазута, – снижаются. По данным биржи СПБМТСБ, в начале 2016 года мазут стоил примерно 2,7 тыс. руб. за тонну, что в 3,7 раза дешевле по сравнению с ценой в середине 2015 года [1]. Такая ценовая политика способствует росту числа предприятий, переоборудованных для использования более дешевого вида топлива – мазута. Складывающаяся ситуация требует введения специальных мер, направленных на борьбу с выбросами вредных веществ в окружающую среду. Одной из таких мер является добавление в камеру сгорания присадки в виде обезвоженного карбонатного шлама, позволяющей связывать серу, содержащуюся в топливе в процессе его сгорания, тем самым уменьшая выбросы оксидов серы в атмосферу до 50%. При проведении физического эксперимента с применением карбонатного шлама также удалось уловить оксид ванадия [2–4].

Основной проблемой использования карбонатного шлама на ТЭЦ является его доставка в камеру сгорания. Как правило, шлам транспортируют по средствам воздуховода, оборудованного специальной воронкой для приема требуемого материала. Данную методику применить полноценно к присадке в виде обезвоженного карбонатного шлама не удалось, так как в силу своих свойств он слипался в воронке. В результате присадка поступала в камеру сгорания неравномерно, что сопровождалось уменьшением эффективности ее действия.

Для транспортирования различных видов мелкодисперсных материалов обычно используют пневмотранспортные устройства разной конструкции. Их разделяют в зависимости от характера работы на всасывающие, нагнетательные или всасывающе-нагнетательные установки. Принцип действия данных установок схож: перемещение сыпучего материала с помощью сжатого или разреженного газа [5–7]. Применительно к нашему случаю пневмотранспортных установок нет, поскольку транспортировку присадки в воздуховод необходимо осуществлять равномерно малыми порциями с массовым расходом 30–200 г/с из емкости в виде бочки объемом 200 л. Существующие же пневмотранспортные установки предназначены для транспортировки больших объемов или же не подходят конструктивно, т.е. выполнение данных условий невозможно. В связи с этим необходима разработка устройства, осуществляющего равномерное транспортирование присадки из емкости в виде боч-

ки в воздуховод или непосредственно в камеру сгорания.

Авторами данной статьи было разработано пневмотранспортное устройство нагнетательного действия (рис. 1). Оно представляет собой крышку, имеющую: входное отверстие 1 диаметром $d_1 = 40$ мм, соединяющее линию подачи воздуха 2 и распределительное устройство 3 с пятью выходными каналами диаметром 18 мм каждый, через которые проходит

нагнетаемый компрессором воздух; и выходное отверстие 4 диаметром $d_4 = 70$ мм. Крышка надевается на емкость с присадкой. Распределительное устройство 3 равномерно опускается на уровень поверхности присадки по мере выдувания частиц из емкости. К выходному отверстию 4 подсоединяется линия подачи материала, через которую выдуваемый порошок из емкости транспортируется в воздуховод.

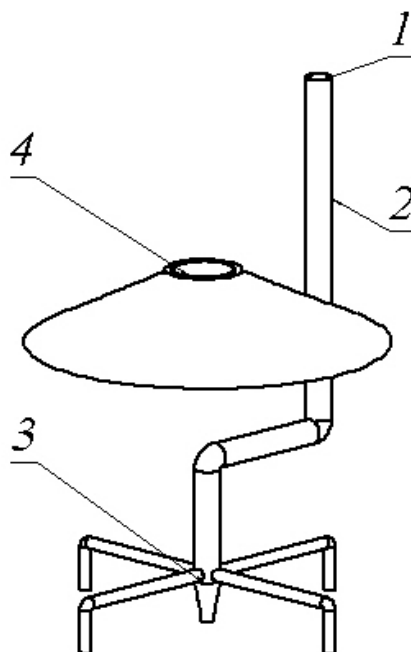


Рис. 1. Разработанное пневмотранспортное устройство нагнетательного действия
Fig. 1. Developed pneumatic conveying device of discharge action

Задачи исследования

При проектировании пневмотранспортной установки важной задачей является подбор наиболее оптимальных геометрических размеров элементов установки и ее наиболее рациональных физических параметров: скорости газового потока в линии подачи воздуха, давлении на входном и выходном отверстиях, необходимых для эффективной работы установки в целом. Существенной проблемой является необходимость гашения центробежной силы, возникающей в емкости при транспортировании из нее присадки вследствие цилиндрической формы емкости. Решением данной проблемы является создание распре-

делительного устройства с несколькими выходными каналами, расположенными осесимметрично относительно центра емкости и позволяющими гасить возникающую центробежную силу. Пример конструктивного исполнения выходных каналов распределительного устройства представлен на рис. 1, имеющего пять выходных каналов, четыре из которых размещены осесимметрично. Также возможно изменение числа осесимметричных выходных каналов у распределительного устройства: уменьшение количества выходных каналов до двух или увеличение до восьми (рис. 2).

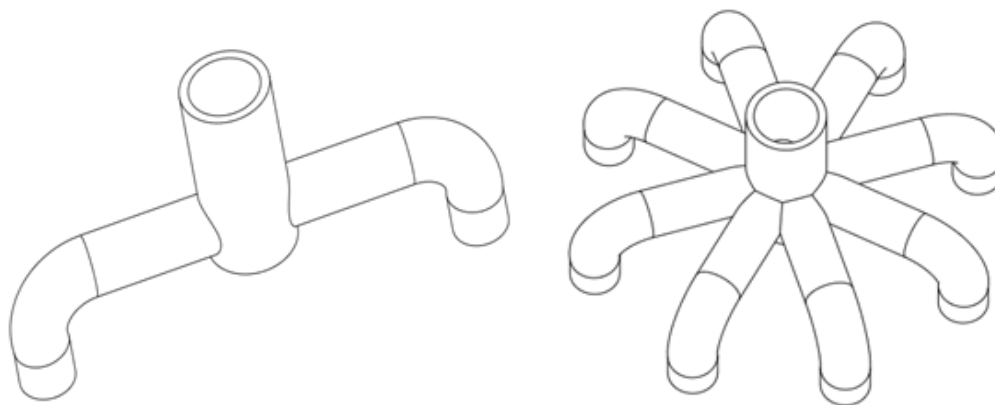


Рис. 2. Распределительные устройства с разным количеством выходных каналов
Fig. 2. Distributing devices with different number of outlet channels

Наибольший интерес вызывает задача по определению количества выходных каналов у распределительного устрой-

ства для достижения максимальной эффективности работы пневмотранспортной установки.

Методы исследования

Методика расчета базируется на компьютерном моделировании в программном модуле SolidWorks Flow Simulation, основанном на методе конечных элементов. Преимуществом данной программы, по сравнению с аналогами, например, с гидродинамическим пакетом Ansys, является возможность моделирования геометрии и выполнения всех расчетов и анализов «в одном окне».

Для проведения численного моделирования была построена 3D-модель емкости, заполненной присадкой, с пневмот-

транспортным устройством (рис. 3). В данном случае распределительное устройство имело девять выходных каналов: один центральный и восемь осесимметричных. В ходе численного моделирования геометрия распределительного устройства изменялась на варианты конструкций, представленных на рис. 2. Далее будут указываться распределительные устройства с двумя, четырьмя и восьмью выходными отверстиями, однако каждое распределительное устройство имеет также центральное отверстие.

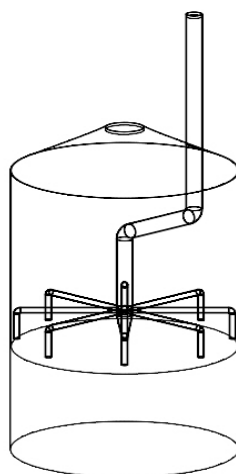


Рис. 3. Трехмерная модель емкости с пневмотранспортным устройством
Fig. 3. Three-dimensional model of the tank with a pneumatic conveying device



Численный расчет проводился при следующих допущениях: процесс течения газового потока стационарен; концентрация карбонатного шлама исключает взаимодействие между частицами; влияние частиц на движение несущей среды не учитывается [8].

Для расчетной модели были заданы следующие условия однозначности. Физические условия: в качестве материала емкости и пневмотранспортного устройства выбрана сталь; в качестве газового потока – воздух; в качестве карбонатного шлама задавались частицы плотностью $\rho_p = 4000 \text{ кг/м}^3$, диаметр частиц присадки $d_p = 75 \text{ мкм}$. Начальные условия: температура окружающей среды $T_{\text{нач.}} = 20^\circ\text{C}$. Граничные условия: скорость газового потока

на входном отверстии $W = 15 \text{ м/с}$; давление на выходном отверстии $P = 10^5 \text{ Па}$. Геометрические условия: диаметр емкости $d_c = 600 \text{ мм}$; толщина стенки $\delta = 1 \text{ мм}$; диаметр входного отверстия $d_1 = 40 \text{ мм}$; диаметр выходного отверстия $d_4 = 70 \text{ мм}$; диаметры выходных каналов распределительного устройства $d_3 = 18 \text{ мм}$; высота емкости $h = 840 \text{ мм}$.

В ходе исследований один из вышеперечисленных параметров изменялся, а другие оставались постоянными. Изучалось влияние изменения скорости газового потока в пневмотранспортной установке на эффективность выдувания частиц из емкости при разной геометрии распределительного устройства.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты компьютерного моделирования показали, что количество выходных отверстий распределительного устройства существенно влияет на эффективность пневмотранспортирования.

На рис. 4 представлена зависимость массового расхода частиц мелкодисперсного материала на выходном отверстии от скорости газового потока, подающегося во входное отверстие. Мы видим, что наибольшая эффективность транспортирования карбонатного шлама из емкости достигается с увеличением скорости газового потока. Как отмечалось ранее, вследствие цилиндрической формы емкости существует необходимость гашения центробежной силы, возникающей при транспортировании присадки. Для этого необходимо подавать воздух в емкость в разные точки поверхности мелкодисперсного материала. Логично предположить, что чем больше точек, из которых выдувается карбонатный шлак, тем легче гасить центробежную силу. Однако эффективность работы распределительного устройства с четырьмя выходными отверстиями оказалась выше распределительного устройства с восемью выходными отверстиями: из-за модернизации появилось большее количество местных сопротивлений в результате четырех допол-

нительных выходных отверстий.

В связи с добавлением восьми выходных отверстий центробежная сила в емкости уменьшилась, но большие потери давления в пневмотранспортной установке не позволили получить более высокую эффективность транспортирования присадки по сравнению с распределительным устройством с четырьмя выходными отверстиями. Наименьшая эффективность пневмотранспортирования отмечалась при использовании распределительного устройства с двумя выходными отверстиями. В данном случае двух выходных отверстий распределительного устройства не хватает для эффективного гашения центробежной силы. Скорость газового потока $W = 20\text{--}27 \text{ м/с}$ является крайним порогом, при котором возможно выдувание присадки из емкости, так как необходимо транспортировать присадку в воздухопровод с определенным массовым расходом – $G_n = 30\text{--}200 \text{ г/с}$. Компьютерное моделирование проводилось при заданной плотности частиц $\rho_p = 4000 \text{ кг/м}^3$; в реальных условиях значения плотности частиц присадки, как правило, меньше, поэтому полученные значения массового расхода частиц G_n меньше от реальных значений на 10–20%.

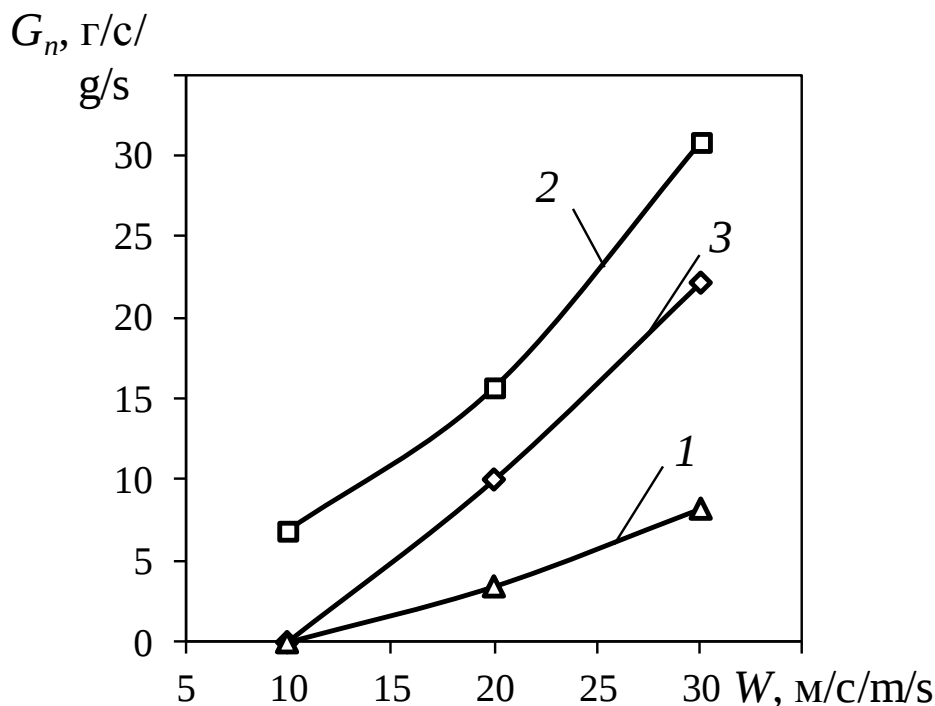


Рис. 4. Зависимость массового расхода частиц G_n мелкодисперсного материала от скорости W при разном количестве выходных отверстий распределительного устройства: 2 выходных отверстия (1); 4 выходных отверстия (2); 8 выходных отверстий (3)

Fig. 4. Dependence of mass flow of particles G_n of finely divided material on velocity W at different number of distributing device outlets: 2 outlet openings (1); 4 outlet openings (2); 8 outlet openings (3)

На рис. 5 представлена зависимость массового расхода воздуха на выходном отверстии от скорости газового потока, подающегося во входное отверстие. Наибольшие значения массового расхода воздуха, как и в случае с массовым расходом частиц, имеет пневмотранспортная установка с распределительным устройством, имеющим 4 и 8 выходных отверстий соответственно. Распределительное устройство с четырьмя выходными отверстиями имеет в среднем значение массового расхода воздуха на 12,7% выше, чем распределительное устройство с восемью выходными отверстиями. Распределительное устройство с двумя выходными отверстиями имеет самые низкие показатели эффективности. Это связано с тем, что конструкция данного распределительного устройства не позволяет гасить центробежную силу в емкости до значений, как в случае с распределительными устройствами с четырьмя и восемью выходными отверстия-

ми. С другой стороны, распределительное устройство с двумя выходными отверстиями имеет самые низкие потери давления. Таким образом, уменьшение потери давления в пневмотранспортной установке ведет к увеличению центробежной силы в емкости, примером является пневмотранспортная установка с распределительным устройством с двумя выходными отверстиями. Уменьшение же центробежной силы в емкости влечет увеличение потери давления в пневмотранспортной установке, примером является пневмотранспортная установка с распределительным устройством с восемью выходными отверстиями. Наиболее оптимизированной пневмотранспортной установкой, в которой нет существенного преобладания потери давления над центробежной силой или наоборот, является пневмотранспортная установка с распределительным устройством с четырьмя выходными отверстиями.

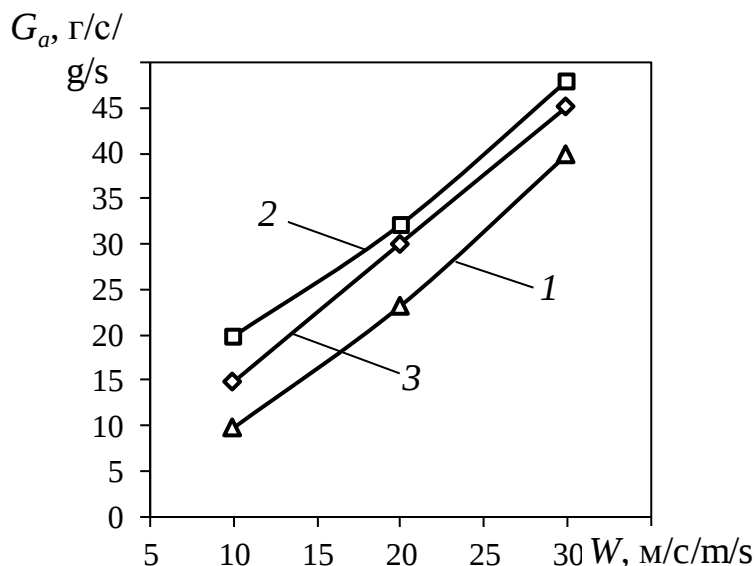


Рис. 5. Зависимость массового расхода воздуха G_a от скорости W , при разном количестве выходных отверстий распределительного устройства: 2 выходных отверстия (1); 4 выходных отверстия (2); 8 выходных отверстий (3)

Fig. 5. Dependence of mass air flow G_a on velocity W at different number of distributing device outlets: 2 outlet openings (1); 4 outlet openings (2); 8 outlet openings (3)

Проведенные исследования показали, что использование распределительного устройства позволяет довольно эффективно гасить центробежную силу. Однако важным требованием при создании пневмо-

транспортных установок для выдувания частиц из емкостей, имеющих круглое сечение, является необходимость определения зависимости потери давления в установках от центробежной силы в емкостях.

Выводы

Проведенные численные исследования позволяют произвести выбор наиболее оптимальной конструкции распределительного устройства пневмотранспортной установки. Так, например, для эффективного транспортирования карбонатного шлама из емкости цилиндрической формы лучшим решением стало применение пневмотранспортной установки с распределительным устройством, имеющим четыре выходных

отверстия. Применение предлагаемого распределительного устройства с четырьмя выходными отверстиями позволит транспортировать присадку из емкости с необходимым массовым расходом – 30–200 г/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-5215.2016.8.

Библиографический список

1. Фомичева А., Скорлыгина Н., Барсуков Ю. Мазут выходит из резервов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2902208> (20.06.2017).
2. Зверева Э.Р., Ганина Л.В., Андрияшина И.А. Влияние присадки на эксплуатационные свойства топочных мазутов // Химия и технология топлив и масел. 2009. № 5. С. 31–33.
3. Зверева Э.Р. Присадки к топочным мазутам // Известия высших учебных заведений. Проблемы

- энергетики. 2011. № 1–2. С. 7–17.
4. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., Ахметвалиева Г.Р. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту // Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 50–56. DOI: 10.1134/S0040363617080112
5. Малис А.Я., Касторных М.Г. Пневматический транспорт для сыпучих материалов. М.: Агропромиздат, 1985. 344 с.



6. Земерев Е.С., Малинин В.И. Неравновесное изотермическое критическое истечение порошкогазовой среды из отверстия // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 1. С. 57–61.
7. Чальцев М.Н., Войцеховский С.В. Расчет удельных потерь давления при пневматическом транспортировании мелкодисперсных материалов // Ве-

сти Автомобильно-дорожного института. 2006. № 1 (2). С. 54–58.

8. Кузнецова А.А. К вопросу о методах расчета процессов пневмотранспорта сыпучих строительных материалов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 164.

References

1. Fomicheva A., Skorlygina N., Barsukov Ju. Fuel oil is out of reserves. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/2902208> (accessed 20 June 2017).
2. Zvereva E.R., Ganina L.V., Andryushina I.A. Vliyanie prisadki na jekspluatacionnye svojstva topochnyh mazutov [Effects of additives on the working properties of furnace heavy fuel oils]. *Himija i tehnologija topliv i masei* [Chemistry and technology of fuels and oils]. 2009, no. 5, pp. 31–33. (In Russian).
3. Zvereva E.R. *Prisadki k topochnym mazutam* [Additives to furnace fuel oil]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki* [Proceedings of higher educational establishments. Energy problems]. 2011, no. 1–2, pp. 7–17. (In Russian).
4. Zvereva E.R., Dmitriev A.V., Shageev M.F., Ahmetvalieva G.R. *Rezultaty promyshlennyh ispytanij karbonatnoj prisadki k mazutu* [Results of industrial tests of carbonate additive to fuel oil]. *Teplojenergetika* [Thermal Engineering]. 2017, no. 8, pp. 50–56. (In Russian). DOI: 10.1134/S0040363617080112
5. Malis A.Ya., Kastornykh M.G. *Pnevmaticheskij transport dlja sypanyh materialov* [Pneumatic transport

for bulk materials]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985, 344 p. (In Russian).

6. Zemerev E.S., Malinin V.I. *Neravnovesnoe izotermicheskoe kriticheskoe istechenie poroshkovogazovoj sredy iz otverstija* [Nonequilibrium isothermal critical outflow of the powder-gas medium from the hole]. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of technological university]. 2017, vol. 20, no. 1, pp. 57–61. (In Russian)

7. Chaltsev M.N., Voytsekhovskiy S.V. *Raschet udel'nyh poter' davleniya pri pnevmaticheskom transportirovanii melkodispersnyh materialov* [Calculation of specific pressure drop during pneumatic conveying of bulk solids]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta* [Bulletin of the Automobile and Highway Institute]. 2006, vol. 2, no. 1, pp. 54–58. (In Russian).

8. Kuznetsova A.A. *K voprosu o metodah rascheta processov pnevmotransporta sypanyh stroitel'nyh materialov* [On the question of methods of calculating processes of pneumatic conveying of bulk construction materials]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2012, no. 3, p. 164. (In Russian)

Критерий авторства

Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С. разработали пневмотранспортное устройство нагнетательного действия, провели исследования и написали статью. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. have developed a pneumatic conveying device of discharge action. They conducted the research and wrote the manuscript. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 22.11.2017 г.

The article was received 22 November 2017



РЕГУЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРЕНАСТРАИВАЕМОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С МИШЕНЬЮ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

© А.Г. Дьяконов¹, Р.К. Фаттахов²

Уфимский государственный авиационный технический университет,

Российская Федерация, 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Расширение функциональных возможностей технологии магнетронного напыления материалов при обработке подложек сложной геометрии. **МЕТОДЫ.** Характер распределения составляющих магнитного поля определяется в перенастраиваемой магнетронной распылительной системе (ПНМРС), имеющей мишень конечной ширины, путем решения уравнения Лапласа. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Приведены теоретические зависимости составляющих магнитного поля в ПНМРС в зависимости от параметров ПНМРС и скорости перемещения катода-мишени. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показана перспективность данного метода расчета магнитных полей в зазоре ПНМРС при напылении (обработке) протяженных подложек сложной геометрии (например, лопаток газотурбинного двигателя) при использовании вакуумной ионно-плазменной обработки.

Ключевые слова: магнетронные распылительные системы, магнитные поля, подложки сложной геометрии, термо- и износостойкие покрытия.

Формат цитирования: Дьяконов А.Г., Фаттахов Р.К. Регулирование магнитного поля в перенастраиваемой магнетронной распылительной системе с мишенью конечных размеров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 159–167. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-159-167

MAGNETIC FIELD REGULATION IN THE RETUNED MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM WITH A TARGET OF FINAL SIZES

A.G. Dyakonov, R.K. Fattakhov

Ufa State Aviation Technical University,

12, K. Marks St., Ufa 450000, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is to extend the functional capabilities of the magnetron sputtering technology when machining the substrates of complex geometry. **METHODS.** Laplace's equation is used to determine the distribution nature of magnetic field components in the retuned magnetron sputtering system (RMSS) with the target of final sizes. **RESULTS.** The theoretical relationships of magnetic field components in RMSS are given depending on RMSS parameters and movement speed of the target cathode. **CONCLUSION.** The prospects of this method of magnetic field calculation in RMSS gaps under sputtering (processing) of long substrates of complex geometry (for example, gas turbine engine blades) is shown when using vacuum ion-plasma treatment.

Keywords: magnetron sputtering systems, magnetic fields, substructures of complex geometry, heat –and wear-resistant coatings

For citation: Dyakonov A.G., Fattakhov R.K. Magnetic field regulation in the retuned magnetron sputtering system with a target of final sizes. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 159–167. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-159-167

Введение

Применяемая в настоящее время во многих отраслях промышленности ионная обработка поверхности и, в частности, одна из ее разновидностей – магнетронное напыление материалов, имеет как преимущества, так и существенные недостатки [1]. Применение этой технологии позволяет получать разнообразные пленки металлов и неметаллов на поверхностях

¹Дьяконов Алексей Геннадьевич, старший преподаватель кафедры электромеханики, e-mail: rfattakhov@gmail.com

Aleksei G. Dyakonov, Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering, e-mail: rfattakhov@gmail.com

²Фаттахов Рамиль Касымович, доцент кафедры электромеханики, e-mail: rfattakhov@gmail.com

Ramil K. Fattakhov, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, e-mail: rfattakhov@gmail.com

различных изделий (подложках), придающие этим изделиям необходимые самые разнообразные свойства и характеристики. Однако ее использование достаточно дорого. Одним из путей снижения затрат является расширение функциональных возможностей этой технологии, что может быть достигнуто применением перенастраиваемых магнетронных распылительных систем [2–4].

Цель исследования

Целью исследования является расширение функциональных возможностей технологии магнетронного распыления материалов с использованием ПНМРС при металлизации протяженных (сопоставимых с размерами катода-мишени) подложек сложной геометрии.

Объектом исследования является планарная ПНМРС с вращательным движением катода-мишени относительно магнитной системы, приведенная в [4]. Там же приведены выражения для расчета составляющих магнитного поля в зависимости от параметров системы и скорости вращения катода-мишени относительно магнитной системы при допущении, что вся система бесконечна по двум осям координат. На практике же часто актуальной является задача по определению характеристик магнитного поля при конечных ширине и толщине катода-мишени, а в перспективе и при неоднородных его характеристиках. Согласно [1], планарная магнетронная распылительная система (МРС) традиционной конструкции (рис. 1) состоит из катода-мишени 1, расположенного над верхней торцевой поверхностью магнитопровода 2 Ш-образной формы, анода 3, расположенного над катодом по внешнему контуру постоянных магнитов 4, установленных на центральный полюс, источника постоянного напряжения 5, к которому подключены анод и катод.

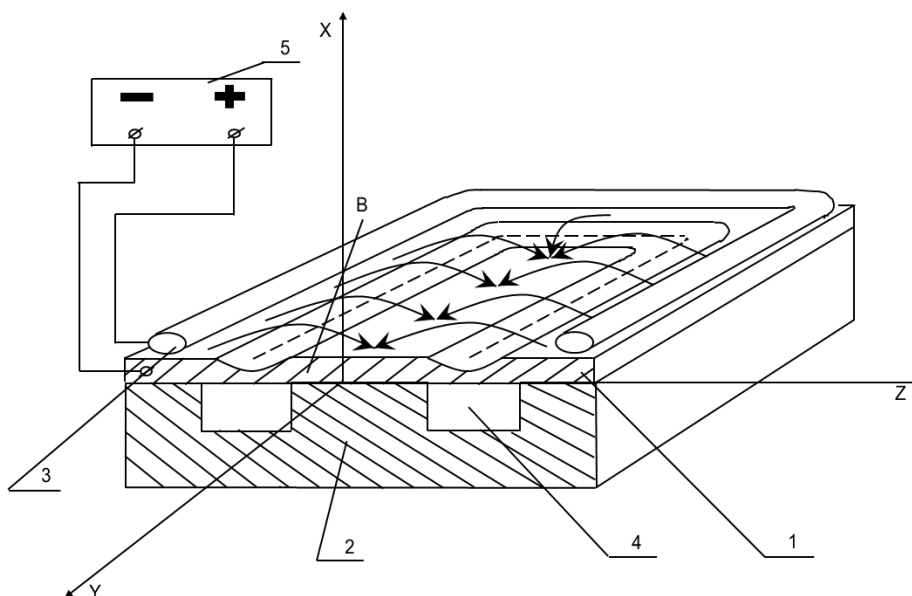


Рис. 1. Устройство магнетронной распылительной системы:
1 – катод-мишень; 2 – магнитопровод; 3 – анод; 4 – постоянный магнит;
5 – источник постоянного напряжения

Fig. 1. Magnetron sputtering system device

1 – target cathode; 2 – magnetic core; 3 – anode; 4 – permanent magnet; 5 – constant voltage source

Согласно [4], конструкция катодного узла планарной ПНМРС, представленная на рис. 2, включает индуктор (магнитную систему) 1, выполненный на постоянных магнитах. Над индук-

тором 1 установлен с возможностью вращения медный водоохлаждаемый держатель 2 с закрепленным на нем катодом-мишенью 3 из распыляемого материала. Над катодом-мишенью 3 располагается покрываемая деталь (подложка) 4 сложной геометрической формы, перемещаемая по двум или трем координатам. ПНМРС размещена внутри вакуумной камеры, привод держателя 2 осуществляется через вакуумный ввод от двигателя, размещенного вне вакуумной камеры (на рис. 2 они не показаны).

При вращении держателя 2 в переменном магнитном поле в нем возникают вихревые токи, искажающие первичное магнитное поле, создаваемое индуктором 1. Меняя скорость (частоту вращения) держателя 2, можно изменять распределение магнитного поля в зазоре ПНМРС и таким образом управлять характеристиками технологического процесса.

В отличие от [4], при конечных размерах держателя 2 с закрепленным на нем катодом-мишенью 3 по радиусу системы необходимо учитывать краевой эффект, т.е. искажение поля в периферийных по оси u зонах МРС (см. рис. 2). Таким образом, нужно учитывать u -ю составляющую магнитного поля, тогда расчетная схема будет выглядеть, как показано на рис. 3.

Для перехода к ней держатель 2 разрезаем по радиусу и вытягиваем в плоскость. Учитывая периодичность расположения индукторов (магнитных систем) 1 под держателем 2, достаточно рассмотреть область лишь одной магнитной системы, имеющей полюсное деление τ . Кроме того, рассматриваем МРС со снятой мишенью 3, т.е. катодом является медный держатель 2, установленный с возможностью перемещения по оси Z со скоростью $v = \omega R$ относительно магнитной системы.

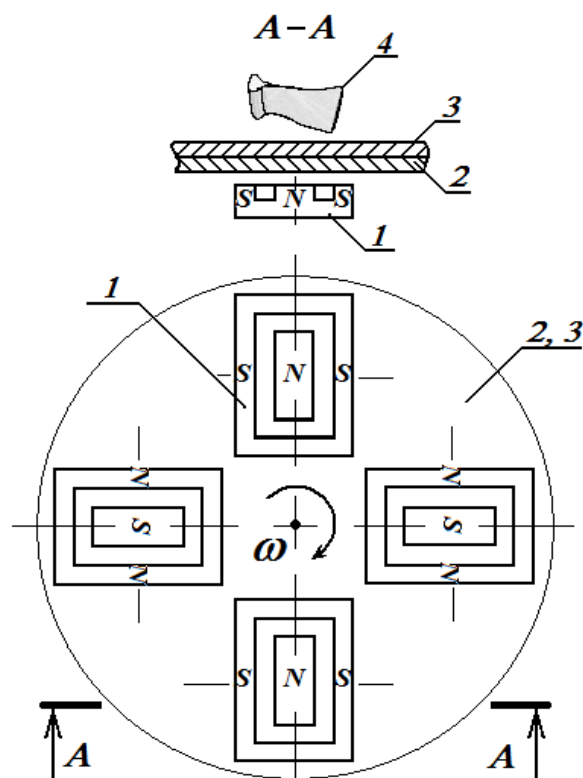


Рис. 2. Конструкция катодного узла планарной ПМРС:
1 – индуктор (магнитная система); 2 – медный водоохлаждаемый держатель;
3 – катод-мишень; 4 – покрываемая деталь (подложка)

Fig. 2. Structure of the cathode assembly of the planar retuned magnetron sputtering system:
1 – inductor (magnetic system); 2 – copper water-cooled chuck;
3 – target cathode; 4 – coated part (substrate)

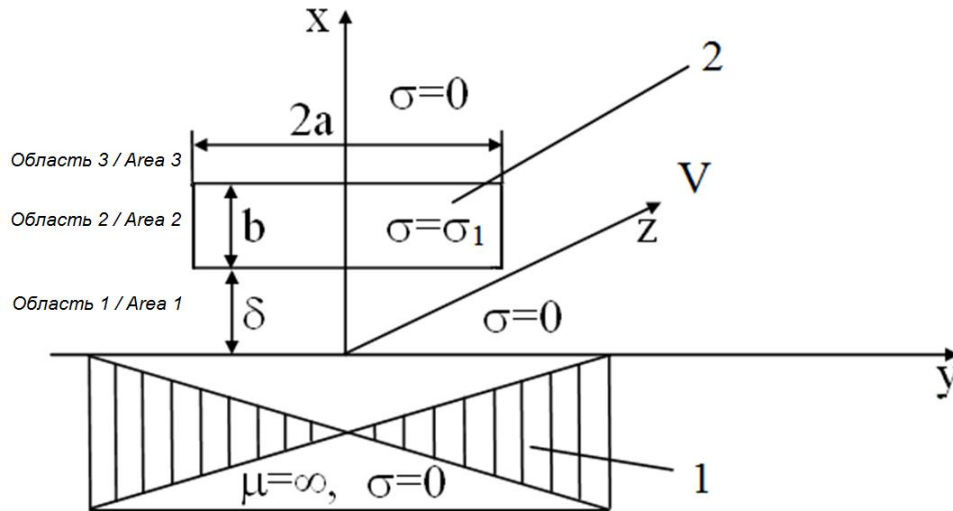


Рис. 3. Расчетная схема
Fig. 3. Calculation model

Методы исследования

Электромагнитные процессы, протекающие в ПНМРС, могут быть описаны известными уравнениями Максвелла для медленно движущихся изотропных (однородных по μ и σ) проводящих сред [5]:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} \bar{H} &= j + j_{cm}; & (1.1) \\ \text{rot} \bar{E} &= -\frac{d\bar{B}}{dt}; & (1.2) \\ \bar{j} &= \sigma (\bar{E} + [\bar{V} \times \bar{B}]); & (1.3) \\ \bar{B} &= \mu \cdot \bar{H}; & (1.4) \\ \text{div} \bar{B} &= 0; & (1.5) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\bar{B}$ – вектор магнитной индукции результирующего поля в зазоре; $\bar{E}$, $\bar{H}$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей индуцированных токов; $\bar{V}$ – вектор скорости движения среды относительно выбранной системы координат; $\bar{j}$ – вектор плотности индуцированного тока проводимости; $\bar{j}_{cm}$ – вектор плотности стороннего тока, обусловленный действием посторонних источников тока – в нашем случае $j_{cm} = 0$; σ – электрическая проводимость материала держателя.

Допущения, принимаемые для решения этой задачи, за некоторыми исключениями, аналогичны представленным в [2]:

1. Магнитная проницаемость стали индуктора (магнитной системы) 1 $\mu_{cm} = \infty$, ее электрическая проводимость $\sigma_{cm} = 0$.

2. Электрическая проводимость медного держателя 2 постоянна, $\sigma = \sigma_1$, его магнитная проницаемость $\mu_{cu} = \mu_0$.



3. Держатель 2 перемещается относительно индуктора 1 с линейной скоростью $v = \omega R$, где ω – угловая скорость вращения держателя; R – радиус, на котором размещены оси индукторов (магнитных систем) 1 (см. рис. 2).

4. Индукция магнитного поля в зазоре (область 1) меняется по гармоническому закону по координате Z :

5.

$$B = B_0 e^{i(\omega t - \alpha z)},$$

где $\alpha = \frac{\pi}{\tau}$, τ – полюсное деление индуктора (магнитной системы) 1 (см. рис. 3).

6. Пространство за держателем (при $x > \delta + b$) однородно; $\sigma = 0$, $\mu = \mu_0$.

При конечной ширине держателя 2 (см. рис. 3) появляются составляющие напряженности H_{y1} , H_{y2} , H_{y3} . Согласно [6], решение уравнения Лапласа в этом случае можно искать в виде рядов.

Комплексные амплитуды напряженности магнитного поля $\dot{H}_m$ в области 1 будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{mz1} &= \sum_{v=0}^{\infty} i\alpha (C_v \operatorname{ch} \gamma_v x + D_v \operatorname{sh} \gamma_v x) \cos \theta_v y; \\ \dot{H}_{my1} &= \sum_{v=0}^{\infty} \theta_v (C_v \operatorname{ch} \gamma_v x + D_v \operatorname{sh} \gamma_v x) \sin \theta_v y; \\ \dot{H}_{mx1} &= -\sum_{v=0}^{\infty} \gamma_v (C_v \operatorname{ch} \gamma_v x + D_v \operatorname{sh} \gamma_v x) \cos \theta_v y. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для области 3:

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{mz3} &= \sum_{v=0}^{\infty} i\alpha K_v e^{-\gamma_v x} \cos \theta_v y; \\ \dot{H}_{my3} &= \sum_{v=0}^{\infty} \theta_v K_v e^{-\gamma_v x} \sin \theta_v y; \\ \dot{H}_{mx3} &= \sum_{v=0}^{\infty} \gamma_v K_v e^{-\gamma_v x} \cos \theta_v y. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В области 2:

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{mz2} &= \sum_{v=0}^{\infty} (M_{zv} \operatorname{ch} \beta_v x + N_{zv} \operatorname{sh} \beta_v x) \cos \theta_v y; \\ \dot{H}_{my2} &= \sum_{v=0}^{\infty} (M_{yv} \operatorname{ch} \beta_v x + N_{yv} \operatorname{sh} \beta_v x) \sin \theta_v y; \\ \dot{H}_{mx2} &= \sum_{v=0}^{\infty} (M_{xv} \operatorname{ch} \beta_v x + N_{xv} \operatorname{sh} \beta_v x) \cos \theta_v y. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



Учитывая быструю сходимость рядов (2)–(4) с ростом координаты x , ограничимся первыми их членами:

Для области 1:

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{mz1} &= i\alpha(Cch\gamma x + Dsh\gamma x)\cos\theta y; \\ \dot{H}_{my1} &= \theta(Cch\gamma x + Dsh\gamma x)\sin\theta y; \\ \dot{H}_{mx1} &= -\gamma(Csh\gamma x + Dch\gamma x)\cos\theta y. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для области 3:

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{mz3} &= i\alpha K e^{-\gamma x} \cos\theta y; \\ \dot{H}_{my3} &= \theta K e^{-\gamma x} \sin\theta y; \\ \dot{H}_{mx3} &= \gamma K e^{-\gamma x} \cos\theta y. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для области 2:

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{mz2} &= (M_z ch\beta x + N_z sh\beta x)\cos\theta y; \\ \dot{H}_{my2} &= (M_y ch\beta x + N_y sh\beta x)\sin\theta y; \\ \dot{H}_{mx2} &= (M_x ch\beta x + N_x sh\beta x)\cos\theta y. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь:

$$\beta^2 = \alpha^2 + \theta^2 + i\mu_0 \sigma \omega s = \gamma^2 + i\mu_0 \sigma \omega s, \quad (8)$$

$$\gamma^2 = \alpha^2 + \theta^2, \quad (9)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2a}. \quad (10)$$

Очевидно, что при $\alpha \rightarrow \infty$, $\theta \rightarrow 0$, H_{y1} , H_{y2} , $H_{y3} \rightarrow 0$ (расчетная схема рис. 2 в [4]).

Определим постоянные интегрирования C , D , K , M , N , используя граничные условия, согласно [6]:

$$C = -\frac{i4A_m}{\pi a}; \quad (11)$$

$$G = \frac{4iA_m \beta ch(\beta(\delta + b))}{\alpha \pi ch \gamma \delta ch \beta b [\gamma \beta (1 + th \gamma \delta) + (\beta^2 + \gamma^2 th \gamma \delta) th \beta b]}, \quad (12)$$



где $A_m = A$ – линейная плотность тока индуктора 1 [6].

$$K = G \frac{\gamma e^{\gamma(\delta+b)}}{\operatorname{ch}(\beta(\delta+b))}, \quad (13)$$

или

$$K = \frac{4iA\beta\gamma e^{\gamma(\delta+b)}}{\alpha\pi\operatorname{ch}(\gamma\delta)\operatorname{ch}(\beta b)[\gamma\beta(1+\operatorname{th}\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2\operatorname{th}\gamma\delta)\operatorname{th}\beta b]}, \quad (14)$$

$$T = -G(\beta + \gamma\operatorname{th}\gamma(\delta+b)), \quad (15)$$

$$W = G[\beta + \gamma\operatorname{th}\gamma(\delta+b)], \quad (16)$$

$$N_x = -\frac{\gamma^2}{\beta}W, \quad (17)$$

$$N_y = \theta T, \quad (18)$$

$$N_z = i\alpha T, \quad (19)$$

$$M_x = -\frac{\gamma^2}{\beta}T, \quad (20)$$

$$M_z = i\alpha W, \quad (21)$$

$$M_y = \theta W, \quad (22)$$

$$D = -C \frac{\gamma\beta(1+\operatorname{th}\gamma\delta)+(\gamma^2+\beta^2\operatorname{th}\gamma\delta)\operatorname{th}\beta b}{\gamma\beta(1+\operatorname{th}\gamma\delta)+(\gamma^2\operatorname{th}\gamma\delta+\beta^2)\operatorname{th}\beta b}. \quad (23)$$

С точки зрения технологии вакуумной обработки наиболее интересны выражения для области 3.



Перепишем (6):

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{mz3} &= -\frac{4\alpha A\beta\gamma e^{\gamma(\delta+b)}}{\alpha\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\cos\theta y; \\ \dot{H}_{my3} &= \frac{4i\theta A\beta\gamma e^{\gamma(\delta+b)}}{\alpha\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\sin\theta y; \\ \dot{H}_{mx3} &= \frac{4i\gamma A\beta\gamma e^{\gamma(\delta+b)}}{\alpha\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\cos\theta y. \end{aligned} \right\} (24)$$

Или согласно [6], учитывая допущение 5:

$$\left. \begin{aligned} \dot{B}_{mz3} &= -\frac{4\alpha\mu_0\dot{H}_0\beta\gamma e^{\gamma(\delta+b)}}{\alpha\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\cos\theta y; \\ \dot{B}_{my3} &= \frac{4i\theta\mu_0\dot{H}_0\beta\gamma e^{\gamma(\delta+b)}}{\alpha\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\sin\theta y; \\ \dot{B}_{mx3} &= \frac{4i\gamma\mu_0\dot{H}_0\beta\gamma e^{\gamma(\delta+b)}}{\alpha\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\cos\theta y. \end{aligned} \right\} (25)$$

Результаты исследования

Результаты исследования целесообразно представить в виде реальных физических величин B_{z3} , B_{x3} и B_{y3} как функций координат и времени. Для этого (25) умножаем на $e^{i(\omega t - \alpha z)}$ и берем реальную часть полученного произведения:

$$\left. \begin{aligned} B_{z3} &= -\frac{4\mu_0 H_0 \beta \gamma e^{\gamma(\delta+b)} e^{i(\omega t - \alpha z)}}{\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\cos\theta y; \\ B_{y3} &= \frac{4\theta\mu_0 H_0 \beta \gamma e^{\gamma(\delta+b)} e^{i(\omega t - \alpha z)}}{\alpha\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\sin\theta y; \\ B_{x3} &= \frac{4\mu_0 H_0 \beta \gamma^2 e^{\gamma(\delta+b)} e^{i(\omega t - \alpha z)}}{\alpha\pi ch(\gamma\delta)ch(\beta b)[\gamma\beta(1+th\gamma\delta)+(\beta^2+\gamma^2th\gamma\delta)th\beta b]}e^{-\gamma x}\cos\theta y. \end{aligned} \right\} (26)$$

Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных

Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных по определению магнитных полей проводился аналогично [3] для $B_0 = \mu_0 H_0 = 0,15$ Тл, полюсное деление $\tau = 0,05$ м; $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Разница максимальных теоретических и экспериментальных значений B_{z3} составляет 7%, максимальное отклонение экспериментального значения от теоретического – 15%. Зона достаточной скорости эрозии мишени ($B_{z3} \geq 0,1$ Т) составляет от 71% для теоретической функции и 61% для экспериментальной. Аналогично для составляющей B_{x3} – разница максимальных теоретических и экспериментальных значений составляет 11%, максимальное отклонение экспериментального значения от теоретического – 12%.



Заключение

Полученные формулы для составляющих магнитного поля в ПНМРС позволяют производить инженерные расчеты магнетронных систем данного типа и обрабатывать характеристики технологического процесса при получении покрытий за счет изменения как параметров ПНМРС, так и скорости перемещения катода-мишени относительно магнитной системы. Используя выражения (26), удалось добиться большей корреляции в результатах теоретического и экспериментального определения составляющих B_{xz} и B_{yz} по сравнению с выражениями (67) и (68) в [4] для данных значений z и x . Используя теоретические расчеты распределения магнитного поля и применения их в технологическом процессе, можно получать равномерные по толщине покрытия с высокой адгезией на протяженной подложке при данных параметрах ПНМРС или, при неизменных характеристиках технологического процесса, оптимизировать параметры самой ПНМРС (размеры катода-мишени, держателя, индуктора (магнитной системы)).

Библиографический список

1. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радиосвязь, 1982. 72 с.
2. Дьяконов А.Г. Магнитные поля в перенастраиваемой магнетронной распылительной системе // Вестник ИрГТУ. 2013. № 8 (79). С. 185–190.
3. Дьяконов А.Г., Лебедев В.А. Результаты теоретического и экспериментального определения магнитных полей в перенастраиваемой магнетронной распылительной системе // Вестник ИрГТУ. 2014. № 6 (89). С. 166–171.
4. Дьяконов А.Г., Фаттахов Р.К., Лебедев В.А. Динамическое регулирование магнитного поля в перенастраиваемой магнетронной распылительной системе // Вестник ИрГТУ, 2016. № 5 (112). С. 105–119.
5. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 272 с.
6. Охременко Н.М. Основы теории и проектирования линейных индукционных насосов для жидких металлов. М.: Атомиздат, 1968. 396 с.

References

1. Danilin B.S., Syrchin V.K. *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy* [Magnetron sputtering systems]. Moscow: Radiosvyaz Publ., 1982, 72 p. (In Russian)
2. Dyakonov A. G. Magnetic fields in the retuned magnetron sputtering system. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2013, no. 8 (79), pp. 185–190. (In Russian)
3. Dyakonov A.G., Lebedev V.A. Results of theoretical and experimental determination of magnetic fields in retuned magnetron sputtering systems. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 6 (89), pp. 166–171. (In Russian)
4. Dyakonov A.G., Fattakhov R.K., Lebedev V.A. Magnetic field dynamic regulation in a retuned magnetron sputtering system. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 5 (112), pp. 105–119. (In Russian)
5. Voldek A.I. *Indukcionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* [Induction magnetohydrodynamic machines with liquid metal actuating fluid]. Leningrad: Energiya Publ., 1970, 272 p. (In Russian)
6. Ohremenko N.M. *Osnovy teorii i proektirovaniya linejnyh indukcionnyh nasosov dlja zhidkih metallov* [Basics of the theory and design of linear induction pumps for liquid metals]. Moscow: Atomizdat Publ., 1968, 396 p. (In Russian)

Критерии авторства

Дьяконов А.Г., Фаттахов Р.К. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Dyakonov A.G., Fattakhov R.K. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 01.12.2017 г.
The article was received 01 December 2017



ИДЕНТИФИКАЦИЯ КЛАССОВ СОСТОЯНИЯ АУТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ЕЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ С ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ

© Фишов А.Г.¹, Петрищев А.В.², Сердюков О.В.³

^{1,2}Новосибирский государственный технический университет,
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20.

³Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, пр-кт акад. Коптюга, 1.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Создан и проходит испытания комплекс средств автоматики для обеспечения режимного и противоаварийного управления автономными системами энергоснабжения с малой генерацией, работающими параллельно с централизованной электрической сетью. Для осуществления автоматического оперирования объектами малой генерации при их параллельной работе с сетью необходимо решить задачу идентификации классов их состояния. **МЕТОДЫ.** Предлагаемый метод решения указанной задачи основан на выявлении существенных структурно-режимных свойств объекта, их представления в виде логических переменных и уравнений. Он является универсальным, не зависящим от схемы объекта. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Представлена логическая основа алгоритма идентификации классов состояния (структурно-режимной идентификации состояния) автономной системы энергоснабжения, используемого автооператором. Предложены основания и критерии классификации состояний системы, математическая модель для определения классов состояния. На примере автономной системы энергоснабжения жилого массива, построенной на базе когенерационной газопоршневой электростанции, показано решение задачи идентификации классов состояния и проведена его проверка на программе-эмуляторе. **ВЫВОДЫ.** Ожидается, что инновационные средства автоматики для малой генерации с автооператором параллельной работы с централизованной электрической сетью будут реализованы в пилотном проекте на одном из энергообъектов в г. Новосибирске и позволят существенно (в разы) снизить затраты на подключение таких объектов к сети, повысить эффективность их работы, снизить потери в сетях.

Ключевые слова: малая генерация, параллельная работа с электрической сетью, режимная и противоаварийная автоматика, идентификация, классы состояний, автоматическое структурно-режимное оперирование.

Формат цитирования: Фишов А.Г., Петрищев А.В., Сердюков О.В. Идентификация классов состояния автономной системы энергоснабжения для управления режимом ее параллельной работы с централизованной электрической сетью // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 168–185. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-168-185

IDENTIFICATION OF STATE CLASSES OF STAND-ALONE POWER SUPPLY SYSTEM TO CONTROL ITS MODE OF PARALLEL OPERATION WITH CENTRALIZED ELECTRICAL NETWORK

A.G. Fishov, A.V. Petrishev, O.V. Serdyukov

Novosibirsk State Technical University,
20 K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russian Federation

Institute of Automation and Electrometry SB RAS,

1 Akademika Koptuga pr., Novosibirsk 630090, Russian Federation

¹Фишов Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, e-mail: fishov@ngs.ru
Aleksandr G. Fishov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Automated Electric Power Systems, e-mail: fishov@ngs.ru

²Петрищев Алексей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, e-mail: alex_v76@mail.ru
Aleksei V. Petrishchev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automated Electric Power Systems, e-mail: alex_v76@mail.ru

³Сердюков Олег Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИАиЭ СО РАН, e-mail: sov@tornado.nsk.ru

Oleg V. Serdyukov, Candidate of technical sciences, Senior Researcher of the Institute of Automation and Electrometry SB RAS, e-mail: sov@tornado.nsk.ru



ABSTRACT. PURPOSE. A complex of automatic equipment has been created and is being tested. It is designed to provide the normal and emergency mode control of the stand-alone power supply systems with distributed generation that operate in parallel with the centralized electrical network. Automatic control of the objects with small generation operating in parallel with the network requires the solution of the identification problem of their state classes. **METHODS.** The proposed solution method of the specified problem is based on the identification of the main structural and mode properties of district power systems and their representation in the form of logical variables and equations. It is universal and does not depend on the facility circuit. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The paper presents a logical basis of the identification algorithm of the state classes (structural-mode state identification) of the district stand-alone system of power supply used by an automatic operator. The reasons and criteria for the classification of the system states are proposed as well as a mathematical model for class state determination. The solution of the identification problem of state classes has been demonstrated on example of a stand-alone power supply system of a residential district, which is built on the basis of a cogeneration gas-piston power plant. Solution of the problem has been verified using an emulator program. **CONCLUSIONS.** Innovative automation equipment for small generation with an automatic operator ensuring parallel operation of a district stand-alone power supply system with the centralized electrical network are expected to be implemented in a pilot project at one of the energy facilities of the city of Novosibirsk. This will significantly (by several times) reduce the cost of connecting such objects to the network and improve their efficiency reducing losses in networks. *Keywords: small generation, parallel operation with the electrical network, mode and emergency automatic equipment, identification, state classes, automatic structure-mode operation*

For citation: Fishov A.G., Petrishev A.V., Serdyukov O.V. Identification of state classes of stand-alone power supply system to control its mode of parallel operation with centralized electrical network. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 168–185. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-168-185

Введение

Автономные системы энергоснабжения (АСЭ) малой мощности на базе топливных электростанций (ТЭС) с синхронными генераторами, как правило, не оснащаются режимной и противоаварийной автоматикой, обеспечивающей возможность их безопасной работы параллельно с внешней сетью и надежность электроснабжения потребителей. Доступные технические решения обеспечения безопасности их присоединения к электрической сети с обменом мощностью дороги используют различные разделяющие вставки (роутеры), поэтому сопоставимы по стоимости с самой ТЭС и обладают существенными недостатками [1, 2].

Автоматика, разрабатываемая Новосибирским государственным техническим университетом и ООО «Модульные системы Торнадо» при участии Института автоматики и электрометрии СО РАН, обеспечивает безопасность параллельной работы АЭС с сетью и надежность электроснабжения потребителей при прямом подключении к внешней сети за счет комплексного (структурно-режимного и противоаварийного) управления.

В работе [3] на примере характерного объекта – автономной системы энергоснабжения жилого массива г. Новосибирска, построенной на базе когенерационной газопоршневой электростанции (ГПУ ТЭС), рассмотрены особенности параллельной работы с сетью автономной системы энергоснабжения малой мощности, а также предложен способ управления режимом параллельной работы малой генерации с сетью с использованием специальной режимной и противоаварийной автоматики.

В статьях [3, 4] дано описание действий автоматики опережающего сбалансированного деления (АОСД) по фиксированным сечениям в сети объекта при внешних (или внутренних) возмущениях и автоматики защиты внешней сети. Это оборудование воздействует на выключатели присоединений АСЭ к внешней сети.

В настоящее время автоматика разработана и проходит испытания на физической модели энергосистемы. Ее программное обеспечение содержит группы алгоритмов:

- базовые (опросы, обмены данными);
- информационно-измерительные;
- противоаварийные;
- режимно-локальные;



- режимно-системные;
- автооператорные;
- интерфейсные.

К группе информационно-измерительных относится алгоритм идентификации классов состояния объекта. Классы состояния используются автооператором системы управления для технологического перевода системы из автономного режима в режим параллельной работы, а также для восстановления нормальных режимов после их нарушения.

В данной работе представлена логическая основа идентификации классов состояния АСЭ, присоединенной к электрической сети на параллельную работу:

- характерные классы состояния (и схема переходов между ними);
- требования к определению и идентификации классов состояния объекта;
- основания и критерии классификации;
- логические уравнения идентификации классов состояния;
- объем контроля;
- алгоритм идентификации;
- программный эмулятор идентификации классов состояния.

Описание автономной системы энергоснабжения

АСЭ представляет собой локальный источник теплоэлектроснабжения (ГПУ ТЭС) микрорайона «Березовое» г. Новосибирска. Схема выдачи мощности ТЭС показана на рис. 1.

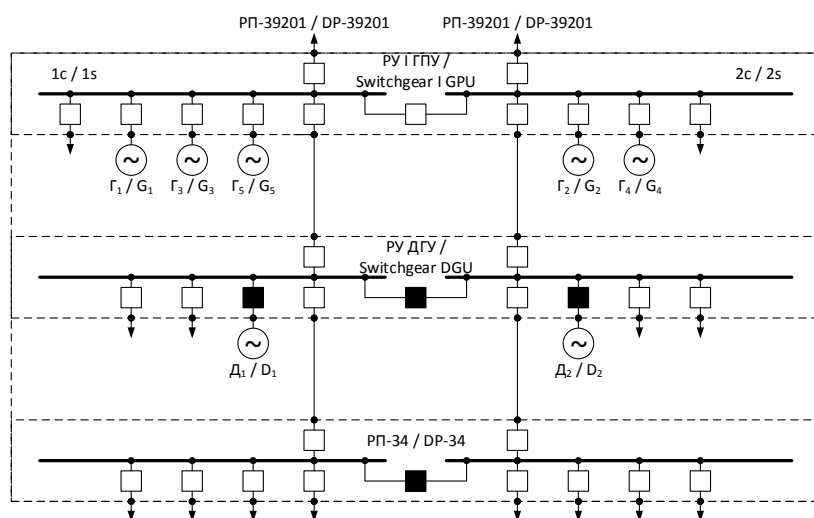


Рис. 1. Схема выдачи мощности ТЭС: Г – генератор; ГПУ – газопоршневая установка; ДГУ – резервная дизель-генераторная установка; РП – распределительный пункт; РУ – распределительное устройство

Fig. 1. Circuit of HPP power distribution: G – generator; GPU – gas piston unit; DGU – backup diesel generator unit; DP – distribution point; RU – distributing device

Основные характеристики схемы РУ I ГПУ:

- номинальное напряжение (10 кВ);
- тип схемы – «одна рабочая секционированная выключателем система шин».

В нормальном автономном режиме работы АСЭ микрорайон «Березовое» и промышленная нагрузка (РП-39201) получают питание от ГПУ ТЭС (5 генераторов по 2 МВт). Резервный источник электропитания ТЭС – два дизельных генератора по 1,6 МВт – может быть введен при отключении ГПУ.



Внешним резервным источником электропитания является электрическая сеть (отпечная подстанция «Силикатная» напряжением 110/10 кВ, разделена на сторонах 110 и 10 кВ, входит в системообразующий контур сети Новосибирской энергосистемы).

Схема присоединения объекта к электрической сети показана на рис. 2.

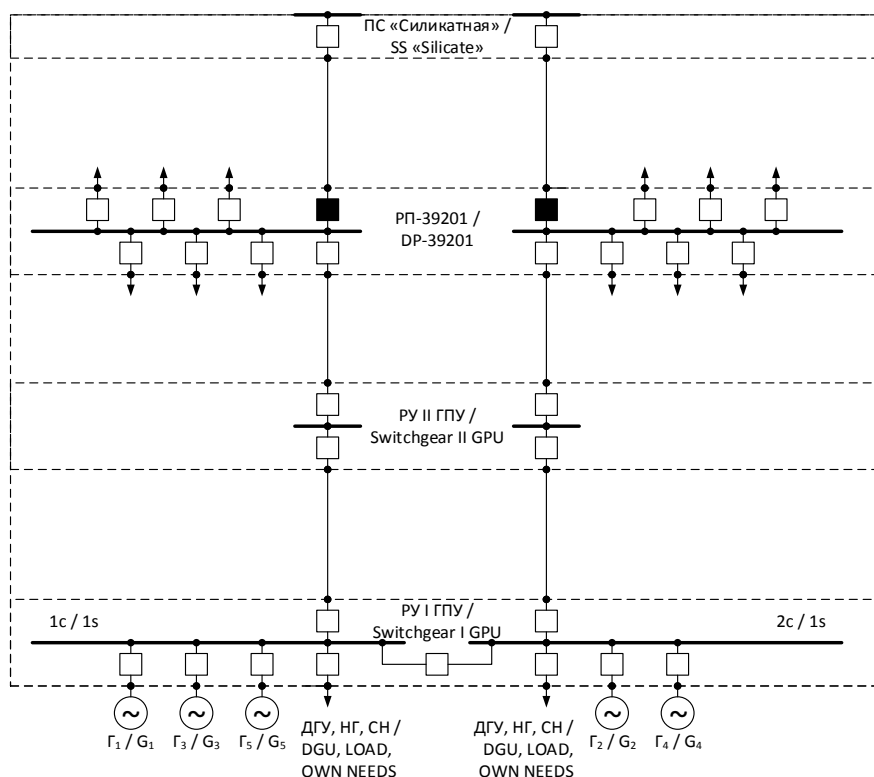


Рис. 2. Схема присоединения АСЭ к внешней электрической сети: Г – генератор; ГПУ – газопоршневая установка; ДГУ – резервная дизель-генераторная установка; НГ – нагрузка; ПС – подстанция; РП – распределительный пункт; РУ – распределительное устройство; СН – нагрузки собственных нужд
Fig. 2. Circuit of Stand alone power supply system connection to the external electrical network: G – generator; GPU – gas piston unit; DGU – backup diesel generator unit; LOAD – load; SS – substation; DP – distribution point; RU – distributing device; OWN NEEDS – load of own needs

Схема обеспечивает автоматический резервный перевод электропитания микрорайона на источники электрической сети (ПС «Силикатная») при отключении всех ГПУ и ДГУ АСЭ.

Параллельная работа ГПУ и ДГУ АСЭ с источниками электрической сети в настоящее время недопустима и блокируется с помощью принятых и выполненных технических решений. Предусмотрена возможность автоматического восстановления нормальной схемы (для автономного режима) по факту готовности ГПУ ТЭС к работе.

Основные характеристики ГПУ ТЭС:

- количество генераторов – 5 шт.;
 - номинальная мощность генератора – 2,0 МВт;
 - максимально допустимый наброс/сброс мощности – 10% номинальной мощности подключенных генераторов;
 - минимально допустимая нагрузка генераторов – 50% от номинальной мощности.
- В этих условиях режим АСЭ характеризуется:
- частым погашением автономно работающих ГПУ в результате набросов мощности;
 - АВР от электрической сети (ПС «Силикатная») после погашения ГПУ;
 - при невозможности АВР вводом в работу ДГУ, покрывающих часть нагрузки;



- длительным восстановлением нормального режима работы с переводом всех потребителей после АВР на питание от ГПУ.

Включение ГПУ АСЭ на параллельную работу с электрической сетью способно дать существенный положительный эффект

- для ТЭС: устранение основной причины нарушений электроснабжения – набросы / сбросы нагрузки – за счет балансирования источниками РЭС; выдача избыточных мощностей (до 6 МВт), что способно решающим образом повлиять на экономическую эффективность АСЭ.

- для РЭС: снижение потерь за счет разгрузки сети; стабилизация напряжения в точке подключения к РЭС (шины ПС «Силикатная») за счет действия регуляторов напряжения ТЭС (нет необходимости в работе РПН); резервирование мощности за счет перевода на питание от ТЭС до 6 МВт нагрузки на ПС «Силикатная».

Требования к классам состояния объекта их идентификации. Классы состояния объекта должны отражать его существенные режимные и структурные свойства и быть выражены через измеряемые режимные и структурные свойства сети (допускается использование априорных данных);

Идентификация классов состояния объекта должна:

- базироваться на операции сравнения значений свойств идентифицируемого состояния объекта со значениями свойств, определяющими класс состояния объекта;

- быть однозначной (результатом идентификации может являться только один класс состояния объекта, множественность результатов указывает на ошибочность идентификации или на взаимное «наложение» классов состояния, отрицательный результат идентификации указывает на ее ошибочность или неполноту множества определенных классов);

- базироваться на информации, полученной по каналам телеизмерений и телесигнализации (допускается использование априорных данных).

Основания и критерии классификации состояний объекта. В качестве оснований классификации состояний системы энергоснабжения предлагается использовать априорную информацию о возможных структурах сети и режимах объекта:

- параллельность/автономность работы объекта и электрической сети;
- объединенность/разделенность объекта на полустанции;
- ущербность режима по отклонению параметров от допустимых значений и нарушению электроснабжения.

Классификационными критериями для предложенных оснований классификации состояний объекта являются:

- значения ряда структурных свойств сети: коммутационная (не)связанность полустанций объекта с электрической сетью; коммутационная (не)связанность полустанций объекта между собой; (не)инцидентность генераторов шинам; (не)инцидентность нагрузок источникам;

- значения режимных параметров (напряжение, ток, частота, мощность в точках контроля): (не)входят в допустимый интервал значений;

- значения сигналов автоматики: (не)сигнализирует об отключении потребителей при отклонении контролируемых режимных параметров – возникновении глубоких снижений частоты и/или напряжения.

Коммутационная связанность объекта с электрической сетью определяется:

- положениями выключателей «включено»;
- равенством частот в точках контроля объекта и электрической сети;
- равенством напряжений для «коротких связей» с незначительными потерями.

Классы состояний объекта и сеть переходов между ними. Выделены 16 характерных классов состояния, которые свойственны объектам рассматриваемого типа.

Эти классы состояния представлены в табл. 1.



Таблица 1

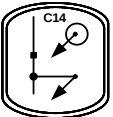
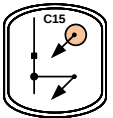
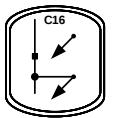
Характерные классы состояния объекта

Table 1

Typical object state classes

Обозначение и пиктограмма / Symbol and pictogram	Наименование / Name
	Нормальная параллельная работа / Normal parallel operation
	Нормальная автономная работа / Normal stand-alone operation
	Резервное питание от внешней сети при отключенных генераторах / Standby power supply from external network with switched-off generators
	Одна полустанция в режиме параллельной работы, потребители второй запитаны от внешней сети, генераторы отключены / One semi-station in the parallel operation mode , consumers of the second one are supplied with power from external network, generators are switched-off
	Нагрузки полустанций обесточены, шины разделены / Semi-station loads are deenergized, buses are divided
	Одна полустанция работает параллельно с сетью с подключенной полной нагрузкой станции / One semi-station operates in multiple with the network with the connected full load of the station
	Одна полустанция работает параллельно с сетью, вторая автономно / One semi-station operates in multiple with the network, the second one is in stand-alone mode
	Обе полустанции работают независимо, автономно / Both semi-stations operate independently, in a stand-alone mode
	Одна полустанция работает параллельно с сетью, вторая ущербно, автономно / One semi-station operates in multiple with the network, the second one is defective, operates in a stand-alone mode
	Обе полустанции работают автономно, одна из них – ущербна / Both semi-stations operate in a stand-alone mode, one of them is defective
	Полустанции объединены и работают автономно, одна из них ущербна / Semi-stations are connected and operate in a stand-alone mode, one of them is defective
	Обе полустанции работают раздельно, автономно и ущербно / Both semi-stations operate independently, in a stand-alone mode and are defective
	Станция работает автономно, обе полустанции ущербны / The station operates in a stand-alone mode, both semi-stations are defective



	Одна полустанция работает автономно, потребители второй запитаны от внешней сети, генераторы отключены / One semi-station operates in a stand-alone mode, consumers of the second one are supplied with the power from the external network, generators are switched off
	Одна полустанция работает ущербно автономно, потребители второй запитаны от внешней сети, генераторы отключены / One semi-station operates in a stand-alone mode and is defective, consumers of the second one are supplied with the power from the external network, generators are switched off
	Нагрузки одной полустанции обесточены, потребители второй запитаны от внешней сети, генераторы отключены / Loads of one semi-station are deenergized, consumers of the second one are supplied with the power from the external network, generators are switched off

Под «ущербностью» полустанции в автономном режиме понимается ее несбалансированность по нагрузке, выражающаяся в пониженном/повышенном напряжении и/или частоте и/или наличии потребителей, отключенных автоматикой.

Условные изображения (пиктограммы) классов состояния обладают мнемонической функцией. В табл. 2 представлено смысловое содержание элементов этих пиктограмм, отражающее характерные свойства объекта.

Таблица 2

Содержание элементов условных изображений классов состояния объекта

Table 2

Content of conditional image elements of object state classes

Обозначение и пиктограмма / Symbol and pictogram	Содержание / Content
	Режим одиночный (симметричный относительно полустанций) / Single mode (symmetric relative to semi-stations)
	Режим бинарный (несимметричный относительно полустанций) / Binary mode (asymmetrical relative to semi-stations)
	Режим нормальный / Normal mode
	Шина секционированная (секционный выключатель отключен) / The tire partitioned (the section switch is switched-off)
	Шина секционированная (секционный выключатель включен) / Slice bus (section switch is switched on)
	Связь электрическая между объектом и распределительной электрической сетью / Electric connection between an object and distribution electric network
	Нагрузка / Load
	Генерация полустанции / Semi-station generation
	Полустанция, сбалансированная нагрузкой / Load balanced semi-station
	Полустанция, не сбалансированная нагрузкой / Load unbalanced semi-station

Нормально объект длительно находится в состоянии С1 (параллельная работа) или С2 (автономная работа). Возмущения различного вида (изменение нагрузки, частоты, напряжения, замыкания и т.д.) в сети объекта и адаптация конфигурации его сети к последствиям этих возмущений (автоматические и оперативные переключения) меняют режим объекта. Действи-



ями ПА, направленными на предотвращение недопустимых режимов, и действиями РА, направленными на улучшение (оптимизацию) возникающих состояний, объект переводится в другие классы состояния (C3–C16).

Сеть таких переходов показана на рис. 3.

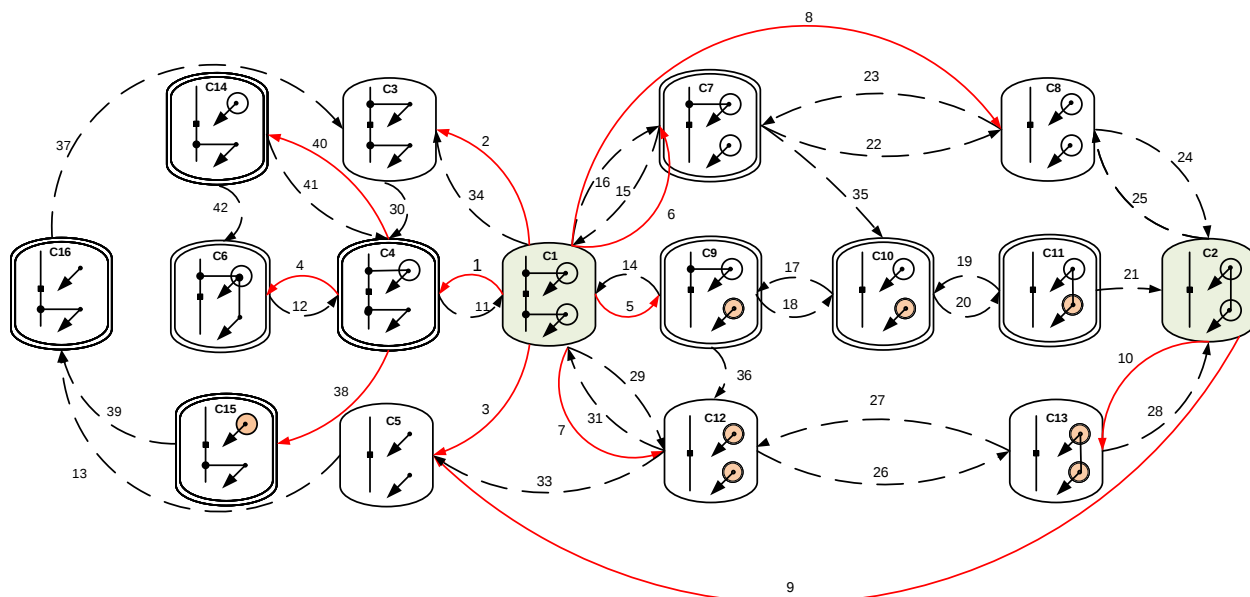


Рис. 3. Сеть переходов между классами состояния объекта: – переход в процессе режимного управления; – переход в процессе автоматического противоаварийного управления

Fig. 3. Network of transitions between object state classes: – transition in the process of mode control; – transition in the process of automatic emergency control

Логические уравнения классов состояния

Бинарность значений свойств, определяющих класс состояния объекта, позволяет представить эти свойства в виде логических переменных. Переменные принимают значения, равные единице при наличии у объекта определенного структурного свойства или при соответствии определенного режимного параметра установленному диапазону. При отсутствии у объекта какого-либо структурного свойства или несоответствии режимного параметра установленному диапазону соответствующая логическая переменная приравнивается к нулю.

Описание логических переменных дано в табл. 3.

Переменные 1, 2, 3 введены парами – для первой и второй полустанции; переменная 4 – единственная. Тогда уравнение одиночного класса состояния объекта может быть записано в виде

$$C = f(LNG_1, GEN_1, DMG_1, SCS, LNG_2, GEN_2, DMG_2) \quad (1)$$

Атрибутивное определение одиночного класса состояния предполагает нормальную конъюнктивную форму функции f :

$$C = (\circ LNG_1) \wedge (\circ GEN_1) \wedge (\circ DMG_1) \wedge (\circ SCS) \wedge (\circ LNG_2) \wedge (\circ GEN_2) \wedge (\circ DMG_2), \quad (2)$$

где $\circ$ – один из операторов, принадлежащих бинарному множеству $\{1, \neg\}$.



Таблица 3

Логические переменные, определяющие класс состояния объекта

Table 3

Logical variables determining object state class

Обозначение / Symbol	Условное изображение / Pictogram	Содержание / Content
LNG		Подключение к шине РЭС полустанции / Connection to the district power network bus of the semi-station
GEN		Подключение к шине полустанции хотя бы одного генератора / Connection to the semi-station bus of at least one generator
DMG		Ущербность полустанции / Semi-station defectivity
SCS		Связь между полустанциями / Connection between semi-stations

Покажем несколько примеров определения одиночного класса состояния через логические переменные:

$$C_1 = (LNG_1) \wedge (GEN_1) \wedge (\neg DMG_1) \wedge (\neg SCS) \wedge (LNG_2) \wedge (GEN_2) \wedge (\neg DMG_2). \quad (3)$$

$$C_2 = (\neg LNG_1) \wedge (GEN_1) \wedge (\neg DMG_1) \wedge (SCS) \wedge (\neg LNG_2) \wedge (GEN_2) \wedge (\neg DMG_2). \quad (4)$$

$$C_3 = (LNG_1) \wedge (\neg GEN_1) \wedge (\neg DMG_1) \wedge (\neg SCS) \wedge (LNG_2) \wedge (\neg GEN_2) \wedge (\neg DMG_2). \quad (5)$$

Уравнение бинарного класса состояния – дизъюнкция двух одиночных:

$$C = f_1(LNG_1, GEN_1, DMG_1, SCS, LNG_2, GEN_2, DMG_2) \vee f_2(LNG_1, GEN_1, DMG_1, SCS, LNG_2, GEN_2, DMG_2) \quad (6)$$

Пример:

$$C_9 = C_{9a} \vee C_{9b}, \quad (7)$$

где

$$C_{9a} = (LNG_1) \wedge (GEN_1) \wedge (\neg DMG_1) \wedge (\neg SCS) \wedge (\neg LNG_2) \wedge (GEN_2) \wedge (DMG_2);$$

$$C_{9b} = (\neg LNG_1) \wedge (GEN_1) \wedge (DMG_1) \wedge (\neg SCS) \wedge (LNG_2) \wedge (GEN_2) \wedge (\neg DMG_2).$$

Переменные, указанные в табл. 3, являются агрегированными. Они представляют существенные свойства объекта в достаточной мере для решения задачи идентификации определенных классов состояния, но не детализируют режим объекта и структуру его сети.

Схема дезагрегирования этих переменных к исходной информации о режиме объекта и структуре его сети, поступающей по каналам телеизмерений и телесигнализации, показана на рис. 4.

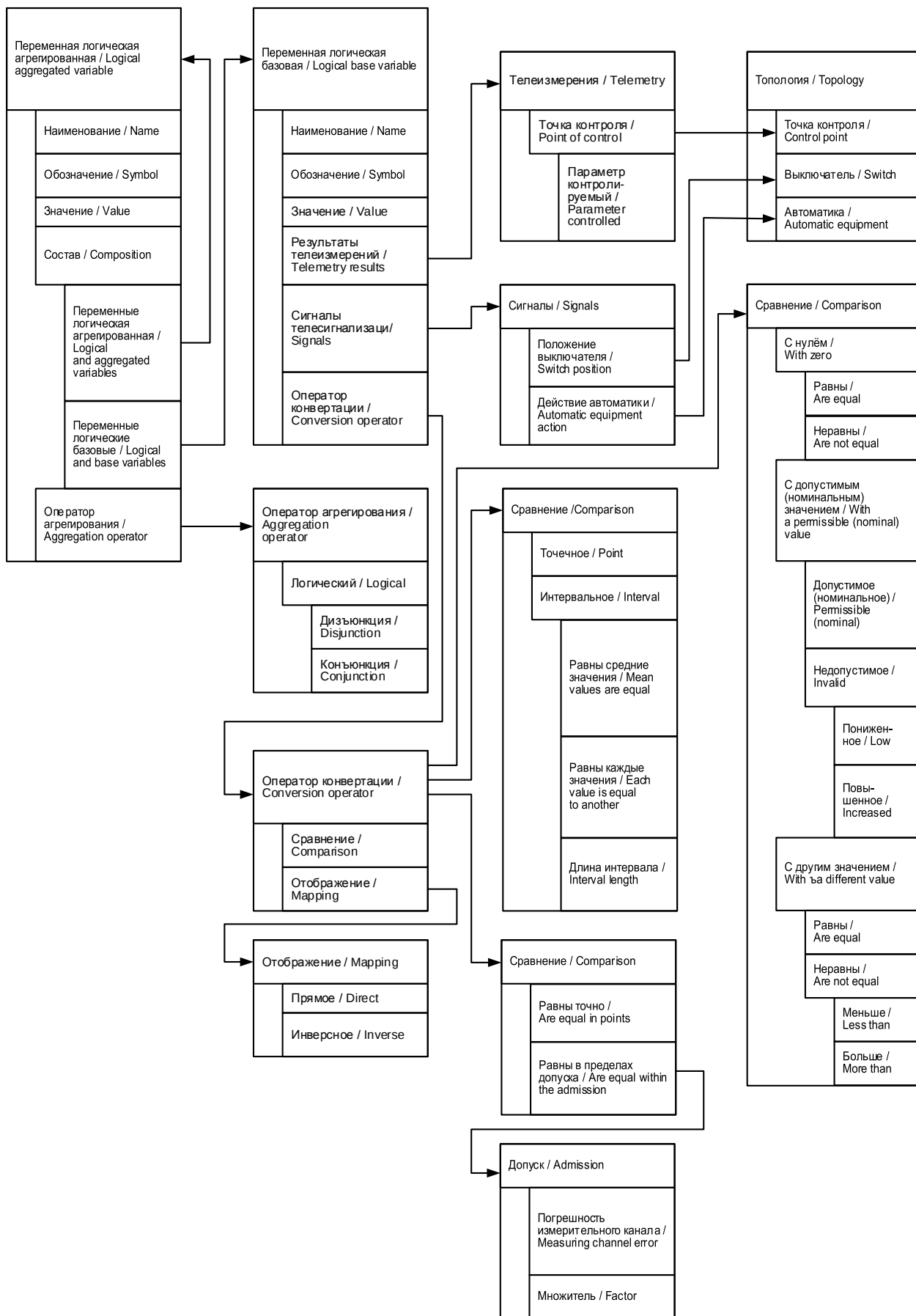


Рис. 4. Схема дезагрегирования логических переменных, определяющих класс состояния объекта
Fig. 4. Block diagram of disaggregation of object state class determining logical variables



Под «базовыми» понимаются логические переменные, значения которых вычисляются непосредственно по результатам телеизмерений и телесигнализации.

В качестве оснований (дез)агрегирования выбран ряд сущностей, свойственных элементам сети характерного объекта и его режиму:

- образование коммутационной связанности шин объекта и электрической сети;
- подключение к шинам объекта генераторов;
- образование коммутационной связанности между шинами объекта в границах его распределительного устройства (РУ);
- допустимость отклонений частоты в точках контроля от номинальных значений;
- допустимость отклонений напряжения в точках контроля от номинальных значений;
- сигнализация автоматики об отключении потребителей от шин объекта.

Результаты дезагрегирования логических переменных, определяющих класс состояния объекта, представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Дезагрегированные логические переменные,
определяющие класс состояния объекта**

Table 4

Disaggregated logical variables determining the object state class

Обозначение / Symbol	Определение / Determination	Примечание / Note
Агрегированные / Aggregated		
LNG	$(Fn_{b,e}) \wedge (B_L)$	$Fn_{b,e}$ – равенство частот в точках контроля b и e на интервале из n измерений / $Fn_{b,e}$ – equality of frequencies in the control points b and e on the interval of n measurements B_L – выключатель одной из линий, образующих связь полустанции и электрической сети, находится в положении ВКЛЮЧЕНО / B_L – switch of one of the lines forming connection between the semi-station and the electrical network is in the (switched) ON position
GEN	$\exists B_G$	B_G – выключатель генератора полустанции находится в положении ВКЛЮЧЕНО / B_G – switch of the semi-station generator is in the (switched) ON position
SCS	B_S	B_S – выключатель секционный находится в положении ВКЛЮЧЕНО / B_S – section switch is in the (switched) ON position
DMG	$FRQ \vee VLT \vee LDA$	FRQ – ущербность полустанции по частоте / FRQ – semi-station defectivity in frequency VLT – ущербность полустанции по напряжению / VLT – semi-station defectivity in voltage LDA – ущербность полустанции по отключению потребителей автоматикой (только для автономного режима) / semi-station defectivity in consumer shutdown by automatic equipment (only for the stand-alone mode)
FRQ	$\exists (F_Z \vee F_L \vee F_H)$	F_Z – частота в точке контроля равна нулю / F_Z – frequency in the control point equals zero F_L – частота в точке контроля меньше минимально



		допустимого значения / F_L – frequency in the control point is less than the minimum admissible value F_H – частота в точке контроля больше максимально допустимого значения / F_H – frequency in the control point is more than the maximum admissible value
VLT	$\exists(U_Z \vee U_L \vee U_H)$	U_Z – напряжение в точке контроля равно нулю / U_Z – voltage in the control point equals zero U_L – напряжение в точке контроля меньше минимально допустимого значения / U_L – voltage in the control point is less than the minimum admissible value U_H – напряжение в точке контроля больше максимально допустимого значения / U_H – voltage in the control point is more the maximum admissible value
LDA	$\exists L_A$	L_A – фидер(ы) нагрузки на шине отключены балансирующей автоматикой / L_A – bus load feeders are disconnected by balancing automatic equipment
B_L	$СигналB_L$	$СигналB_L$ – сигнал положения выключателя линии / B_L signal – signal of line switch position
B_G	$СигналB_G$	$СигналB_G$ – сигнал положения выключателя генератора / B_G signal – signal of generator switch position
B_S	$СигналB_S$	$СигналB_S$ – сигнал положения секционного выключателя / B_S signal – signal of section switch position
$F_{n,b,e}$	$\forall k \in (\overline{1, n} n \leftrightarrow t_0)$ $\exists(f_k(b) - f_k(e) < \Delta f)$	k – порядковый номер измерения в серии измерений от 1 до n / k – sequence number of measurement in a series of measurements from 1 to n n – количество измерений в одной серии / n – number of measurements in one series t_0 – настоящий момент времени / t_0 – present moment of time $f_k(b)$ – частота в точке контроля b, определенная при k-ом измерении $f_k(b)$ / $f_k(b)$ – frequency in the control point b determined at k^{th} measurement of $f_k(b)$ $f_k(e)$ – частота в точке контроля e, определенная при k-ом измерении / $f_k(e)$ – frequency in the control point e determined at k^{th} measurement Δf – максимально допустимая разница измерений частоты в двух точках синхронной части сети (для определения коммутационной связности) / Δf – maximum admissible difference of frequency measurements in two points of a network synchronous part (for switching connectivity determination)
F_Z	$f < f_{zero}$	f – частота в точке контроля /



F_L	$f < f_{\min}$	f – frequency in the control point f_{zero} – максимально допустимая частота, принимаемая равной нулю / f_{zero} – maximum admissible frequency accepted as equal to zero
F_H	$f > f_{\max}$	$f_{\min}$ – минимально допустимая частота в нормальном режиме / $f_{\min}$ – minimum admissible frequency in the normal mode $f_{\max}$ – максимально допустимая частота в нормальном режиме / $f_{\max}$ – maximum admissible frequency in the normal mode
U_Z	$ U < U_{zero}$	$ U $ – модуль напряжения в точке контроля / $ U $ – voltage module in the control point
U_L	$ U < U_{\min}$	U_{zero} – максимальное допустимое напряжение, принимаемое равным нулю / U_{zero} – maximum admissible voltage accepted as equal to zero
U_H	$ U > U_{\max}$	$U_{\min}$ – минимально допустимое напряжение в нормальном режиме / $U_{\min}$ – minimum admissible voltage in the normal mode $U_{\max}$ – максимально допустимое напряжение в нормальном режиме / $U_{\max}$ – maximum admissible voltage in the normal mode
L_A	Сигнал L_A / Signal L_A	Сигнал L_A – сигнал автоматики отключения потребителей / Signal L_A – signal of consumer shutdown by automatic equipment

Объем контроля. Для вычисления значений структурных свойств сети и режимных параметров объекта необходимо сформировать требуемый объем контроля и выбрать размещение точек контроля в сети. Для характерного объекта объем контроля положений выключателей представлен в табл. 5.

При отсутствии телесигнализации о положении выключателей присоединений РУ, ГПУ их положение принимается нормально замкнутым.

Таблица 5

Объем контроля положений выключателей

Table 5

Amount of switch positions control

Выключатель / Switch	B ₁ – B ₄	B ₅ –B ₈	B ₉ , B ₁₀	B ₁₁ –B ₁₅	B ₂₂	B ₃₀ –B ₄₁	B ₅₀ – B ₅₁
Контроль положения / Switch position control	+	–	+	+	+	+	+
Примечание / Note	–	Нормально включены / Normally switched ON	–	–	–	–	–



Объем контроля параметров режима для идентификации классов состояния представлен в табл. 6.

Таблица 6

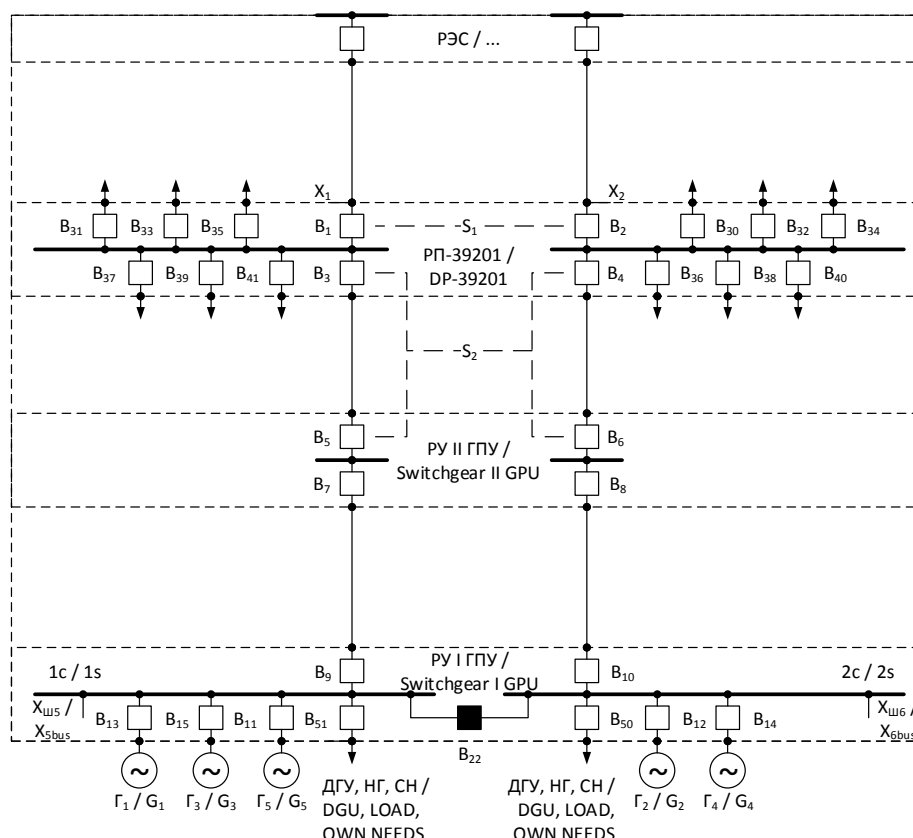
Объем контроля параметров режима

Table 6

Amount of mode parameter control

Измеряемый параметр / Measured parameter		Точка контроля / Control point	
Наименование / Name	Обозначение / Symbol	X_1, X_2	$X_{ш5}, X_{ш6}$
Напряжение / Voltage	$ U $	+	+
Частота / Frequency	f	+	+

Размещение точек контроля показано на рис. 5. Номенклатура контролируемых параметров минимизирована по затратам на создание каналов передачи данных и установку контрольного оборудования (средств измерений).





Объем контроля сигналов автоматики содержит сигналы автоматической частотной разгрузки (АЧР), автоматического ограничения снижения напряжения (АОСН).

Представленные объемы контроля позволяют идентифицировать все определенные классы состояний характерного объекта.

Алгоритм идентификации классов состояния. Основная последовательность действий для идентификации класса текущего состояния объекта:

- инициализация базовых логических переменных;
- агрегирование переменных;
- идентификация класса состояния.

Идентификация класса текущего состояния объекта производится сравнением значений агрегированных логических переменных с соответствующими значениями, свойственными определенным классам состояния. Класс состояния идентифицируется по равенству этих значений.

Алгоритм идентификации класса текущего состояния объекта представлен на рис. 6.

Под «расширенным» множеством классов состояния понимается совокупность одиночных классов состояния и бинарных, приведенных к двум уравнениям вида (1).

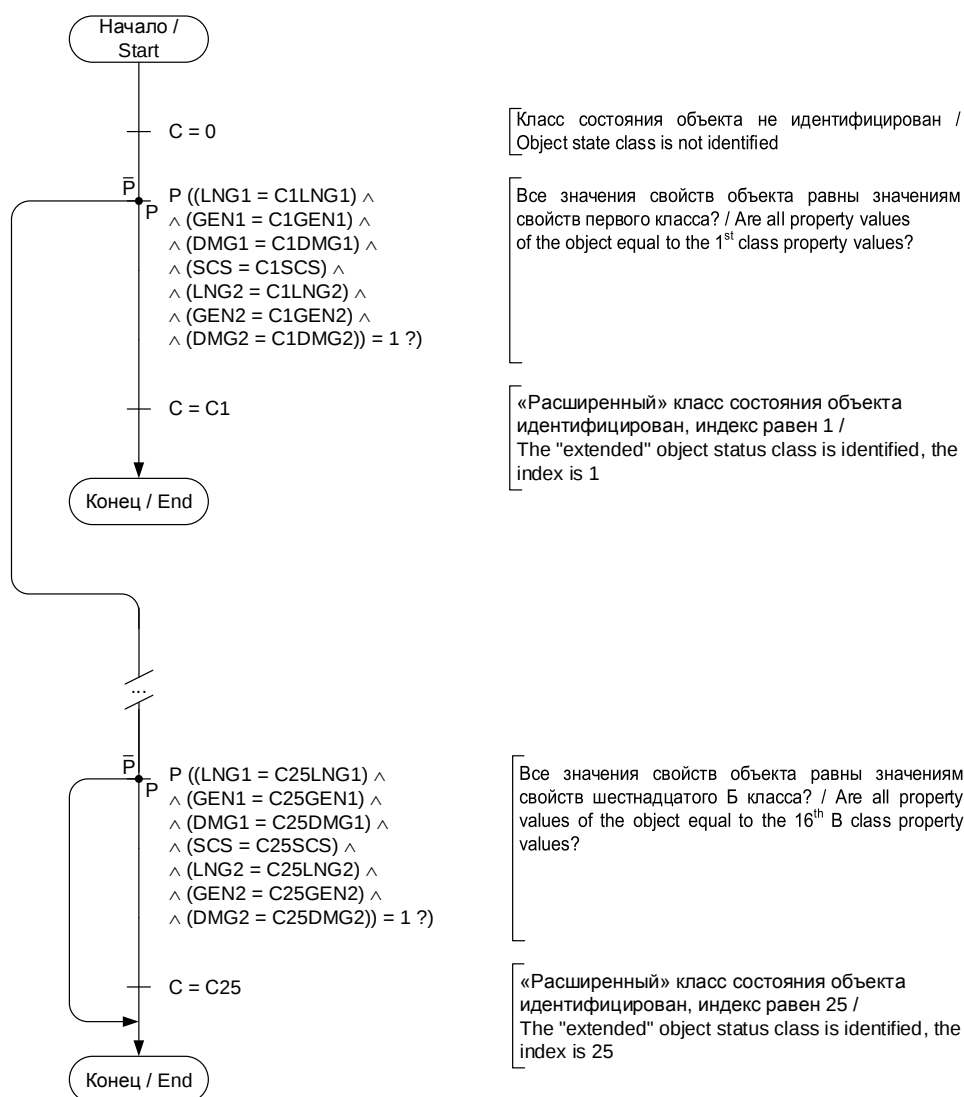


Рис. 6. Алгоритм идентификации класса текущего состояния объекта

Fig. 6. Identification algorithm of the object current state class



Эмулятор идентификации классов состояний. Для проверки правильности логических выражений классов состояний объекта и наглядного представления результатов такой проверки разработана программа-эмулятор со следующими функциями:

- главная – проверка правильности логических выражений идентификации классов состояний объекта;
- основные: наглядное представление результатов проверки правильности логических выражений идентификации классов состояний объекта; отображение электрической схемы объекта; отображение условного изображения идентифицированного класса состояний объекта;
- дополнительные: переопределение идентифицируемых классов состояний объекта; эмуляция режима объекта и его изменений при коммутациях сети; блокировка недопустимых оперативных переключений на основе формализованных правил; контроль ошибок.

Примеры изображений главного окна эмулятора в показаны на рис. 7 и 8.

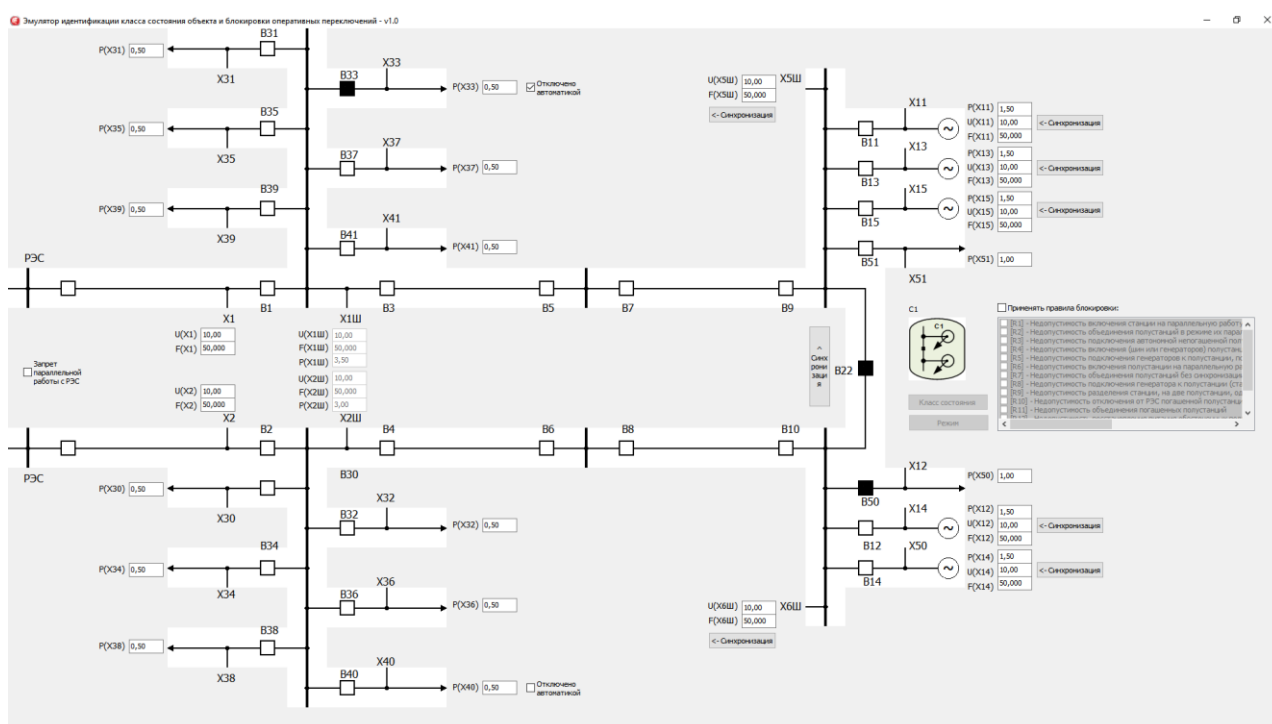


Рис. 7. Главное окно эмулятора (идентифицирован класс состояния C1)
Fig. 7. Emulator main window (identified C1 state class)

Эмулятор испытан по программе, содержащей план факторного эксперимента. Факторами являются положения выключателей, значения частот и напряжений в точках контроля, сигналы автоматики отключения потребителей. Заданные значения факторов преобразуются в значения логических переменных, определяющих эмулируемое состояние объекта. Идентификация класса эмулируемого состояния объекта производится сравнением вычисленных значений логических переменных с predetermined. По равенству этих значений можно судить об успешности идентификации.

На основании результатов испытаний эмулятора сделано заключение о: пригодности эмулятора для проверки правильности логических выражений идентификации классов состояний объекта; правильности предложенных логических выражений идентификации классов состояний объекта.

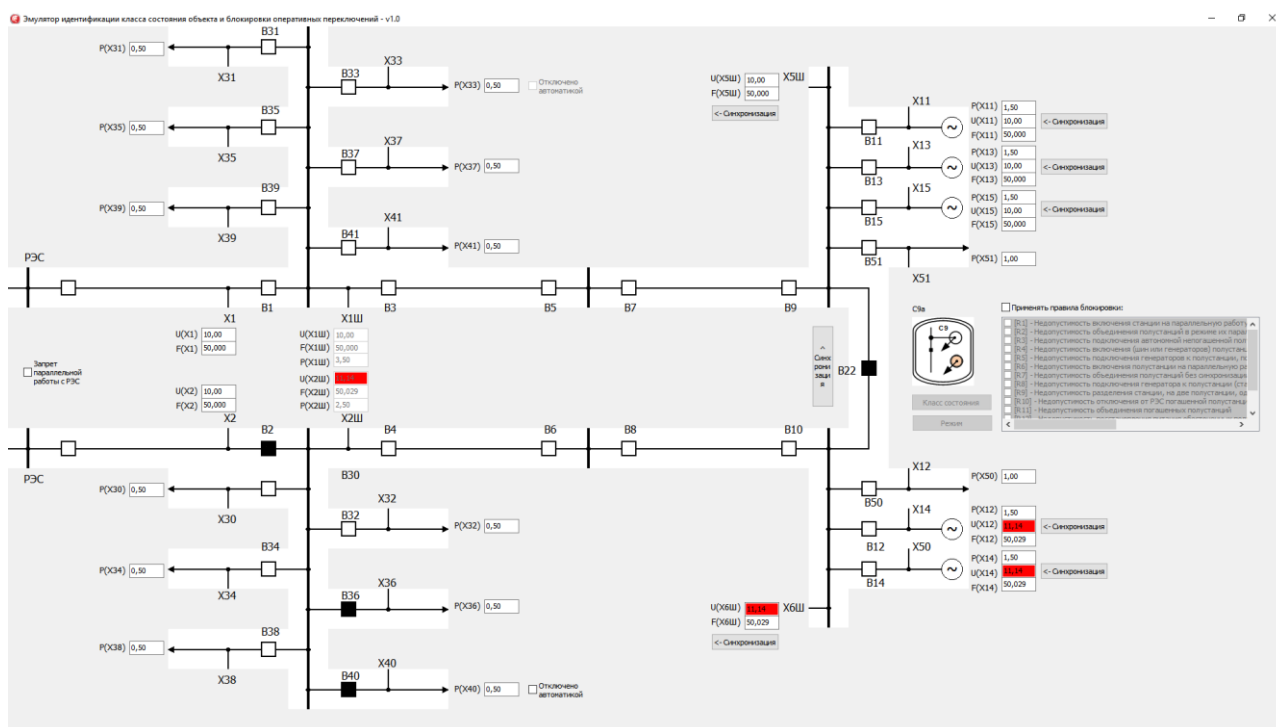


Рис. 8. Главное окно эмулятора (идентифицирован класс состояния C9)
Fig. 8. Emulator main window (identified C9 state class)

Выводы

Задачи классификации состояний системы и идентификации текущего класса состояния решены на примере характерного объекта, для которого создана и проходит испытания автоматика режимного и противоаварийного управления параллельной работы с сетью.

Способ решения, примененный для указанных задач, основан на исследовании существенных режимно-структурных свойств объекта и их представления в виде логических переменных и уравнений. Он является универсальным, не зависящим от схемы объекта.

Автооператорное управление автономной системой энергоснабжения с малой генерацией, присоединяемой к централизованной электрической сети на параллельную работу, – эффективный способ обеспечения надежности их совместного функционирования.

Ожидается, что инновационные автооператорные средства автоматики, обеспечивающие параллельную работу малой генерации с централизованной электрической сетью, будут реализованы в пилотном проекте на одном из энергообъектов в Новосибирске. Они позволят существенно (в 10–20 раз) снизить затраты на подключение таких объектов к сети, повысить эффективность их работы, снизить потери в сетях и затраты на их реконструкцию в связи с присоединением АСЭ.

Тиражирование созданных автооператорных средств автоматики возможно, как на энергообъектах в России, так и в странах-партнерах, приобретающих топливо, как существенный элемент комплексной технологии эффективного использования энергоресурсов (топливо–оборудование–управление).

Библиографический список

1. Илюшин П.В. Особенности реализации делительной автоматики на генерирующих установках объектов распределенной генерации // Релейная защита и автоматика энергосистем 2017: материалы междунар. выставки и конф. (Санкт-Петербург, 25–28 апреля 2017 г.). СПб, 2017. С. 18–25.



2. Илюшин П.В. Анализ особенностей выбора устройств РЗА в распределенных сетях с объектами распределенной генерации // Релейная защита и автоматика энергосистем 2017: материалы междунар. выставки и конф. (Санкт-Петербург, 25–28 апреля 2017 г.). СПб, 2017. С. 43–50.
3. Фишов А.Г., Марченко А.И., Ивкин Е.С., Семедьяев Р.Ю. Автоматика опережающего деления в схемах присоединения малой генерации к электрической сети // Релейная защита и автоматика энергосистем 2017: материалы междунар. выставки и конф. (Санкт-Петербург, 25–28 апреля 2017 г.). СПб, 2017. С. 270–278.
4. Фишов А.Г., Ландман А.К., Сердюков О.В. SMART-технологии для подключения к электрическим сетям и управления режимами малой генерации // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Самара, 02–06 октября 2017 г.). Самара, 2017. Т. 1. С. 27–34.

References

1. Ilyushin P.V. *Osobennosti realizacii delitelnoi avtomatiki na generiruyuschiykh ustanovkakh obektov raspredelennoi generacii* [Implementation features of out-of-step automatics on generating installations of distributed generation facilities]. *Materiali mejdunarodnoi vistavki i konferencii "Releynaya zaschita i avtomatika energosistem"* [Materials of the International exhibition and conference "Relay Protection and Automation for Electric Power Systems"]. St. Petersburg, 2017, pp. 18–25. (In Russian).
2. Ilyushin P.V. *Analiz osobennostei vibora ustroystv RZA v raspredelennykh setyah s obektami raspredelennoi generacii* [Analysis of selection features of relay protection devices in distribution networks with distributed generation objects]. *Materiali mejdunarodnoi vistavki i konferencii "Releynaya zaschita i avtomatika energosistem"* [Materials of the International exhibition and conference "Relay Protection and Automation for Electric Power Systems"]. St. Petersburg, 2017, pp. 43–50. (In Russian).
3. Fishov A.G., Marchenko A.I., Ivkin E.S., Semendyaev R.Yu. *Avtomatika operejayuschego deleniya v shemakh prisoedineniya maloi generacii k elektricheskoi seti* [Automation of advanced division in the circuits of small generation connection to electric network]. *Materiali mejdunarodnoi vistavki i konferencii "Releynaya zaschita i avtomatika energosistem"* [Materials of the International exhibition and conference "Relay Protection and Automation for Electric Power Systems"]. St. Petersburg, 2017, pp. 270–278. (In Russian).
4. Fishov A.G., Landman A.K., Serdyukov O.V. *SMART-tehnologii dlya podklyucheniya k elektricheskim setyam i upravleniya rejimami maloi generacii* [SMART-technologies for connection to electrical networks and control of small generation modes]. *Materiali VIII Mejdunarodnoi molodejnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii "Elektroenergetika glazami molodeji"* [Materials of the VIII International Youth Scientific and Technical Conference "Electric Power Systems through the eyes of the youth"]. Samara, 2017, vol. 1, pp. 27–34. (In Russian).

Критерий авторства

Фишов А.Г., Петрищев А.В., Сердюков О.В. обладают равными авторскими правами и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Fishov A.G., Petrishchev A.V., Serdyukov O.V. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 22.11.2017

The article was received 22 November 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.273:622.772

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-186-193>

ПЕРЕРАБОТКА ВОЛЬФРАМИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

© С.С. Бельский¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Изучение возможности переработки вольфрамитового концентрата с исключением из состава шихты хвостов выщелачивания спеков с одновременным снижением температуры спекания и получением кондиционного триоксида вольфрама. **МЕТОДЫ.** Переработку вольфрамитового концентрата проводили путем спекания его с содой, селитрой и углекислым калием, полученный спек измельчали и направляли на выщелачивание с получением раствора вольфрамата натрия, измеряя плотность которого определяли его концентрацию, что позволило рассчитать прогнозируемое извлечение триоксида вольфрама. Из полученного раствора вольфрамата натрия производили осаждение «искусственного шеелита», который разлагали соляной кислотой с получением вольфрамовой кислоты (ее подвергали термической диссоциации для получения триоксида вольфрама).

РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведена серия лабораторных исследований по переработке вольфрамитового концентрата, в ходе которых было установлено, что компоненты шихты необходимо спекать при температуре 450–500°C при соотношении вольфрамитовый концентрат, сода, углекислый калий и селитра – 1:0,45:0,9:1. Получили порошок триоксида вольфрама с высоким содержанием ценного компонента. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Изучена возможность переработки вольфрамитового концентрата с исключением из состава шихты хвостов выщелачивания спека, снижающих содержание вольфрама в шихте. Определены оптимальные температурные условия проведения процесса спекания и состав шихты, направляемой на спекание с целью получения вольфрамата натрия, из которого после выщелачивания и осаждения «искусственного шеелита» и последующего его разложения соляной кислотой удалось получить порошок триоксида вольфрама с содержанием 99,8% WO_3 .

Ключевые слова: вольфрамитовый концентрат, спекание, углекислый калий, хвосты выщелачивания спека, триоксид вольфрама, вольфрамовая кислота.

Формат цитирования: Бельский С.С. Переработка вольфрамитового концентрата // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 186–193. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-186-193

PROCESSING OF WOLFRAMITE CONCENTRATE

S.S. Belskii

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the article is to study the possibility of wolframite concentrate processing eliminating cake leaching tailings from charge composition while reducing the sintering temperature and obtaining a commercial tungsten trioxide. **METHODS.** Processing of wolframite concentrate was performed by its sintering with soda, saltpeter and potassium carbonate. The obtained sinter was crushed and subjected to leaching with the production of the solution of sodium tungstate. Measurements of sodium tungstate density allowed to determine its concentration and calculate the forecast extraction of tungsten trioxide. The resulting solution of sodium tungstate was decomposed with the precipitation of “artificial scheelite”, which was decomposed by the hydrochloric acid in order to produce a tungsten acid. The latter was subjected to thermal dissociation to obtain tungsten trioxide. **RESULTS.** Having conducted a series of laboratory studies on wolframite concentrate processing it was found that the components of charge are to be sintered at the temperature of 450–500°C at 1:0.45:0.9:1 ratio of wolframite concentrate, soda, potassium carbonate and saltpeter respectively. The powder of tungsten trioxide with a high content of valuable component has been produced. **CONCLUSION.** The possibility of wolframite concentrate processing with the elimination of cake leaching tailings reducing the tungsten content in the charge from charge composition was studied. The optimal temperature conditions of sintering and the composition of charge to be sintered in order to obtain sodium tungstate were determined. Leaching of the resulting sodium tungstate with the following precipitation of the “artificial scheelite” and the decomposition of the latter by hydrochloric acid allowed to produce the powder of tungsten trioxide with 99.8% content of WO_3 .

¹Бельский Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, e-mail: bss@istu.edu

Sergei S. Belskii, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: bss@istu.edu



Keywords: wolframite concentrate, sintering, potassium carbonate, cake leaching tailings, tungsten trioxide, tungstic acid

For citation: Belskii S.S. Processing of wolframite concentrate. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 186–193. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-186-193

Введение

Вольфрам является малораспространенным элементом со средним содержанием в земной коре $10^{-4}\%$ (по массе) [1]. Имеет около 15 собственных минералов, однако с точки зрения промышленного производства практическое значение имеют только минералы группы вольфрамита – $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$, и шеелит – CaWO_4 . Вольфрамит является изоморфной смесью или твердым раствором вольфраматов железа (FeWO_4) и марганца (MnWO_4). Руды вольфрама обычно содержат незначительное количество ценного компонента и относятся к бедным, так в среднем в рудах содержится от 0,14 до 0,5% WO_3 [2]. Кроме того, они являются комплексными, поскольку наряду с минералами вольфрама в рудах присутствуют молибденит (MoS_2), касситерит (SnO_2), пирит (FeS_2), арсенопирит (FeAsS), халькопирит (CuFeS_2) и танталит-колумбит $((\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6)$. Руды обогащают с получением концентратов, содержащих 55–65% WO_3 . Основным продуктом переработки вольфрамовых концентратов наряду с ферровольфрамом, который используется в черной металлургии, является триоксид вольфрама. В настоя-

щее время промышленные схемы переработки вольфрамовых концентратов делят на две группы:

1. Спекание вольфрамовых концентратов с содой или их обработка водными растворами соды в автоклавах с получением растворов вольфрамата натрия, из которых после очистки от примесей производят такие конечные продукты, как паравольфрамат аммония $((\text{NH}_4)_{10}\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42} \cdot 4\text{H}_2\text{O})$, вольфрамовую кислоту (H_2WO_4).

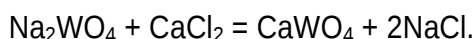
2. Разложение вольфрамовых концентратов кислотами с получением осадков технической вольфрамовой кислоты с последующей ее очисткой от примесей.

Кроме вышеуказанных способов концентраты еще можно разлагать растворами гидроксида натрия [3–7]. Однако данный способ применим лишь для высококачественных вольфрамитовых концентратов (65–70% WO_3), содержащих незначительное количество кремнезема и силикатов.

Что касается разложения вольфрамовых концентратов кислотами, то данным способом перерабатывают шеелит, поэтому при переработке $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ данный способ не рассматривается.

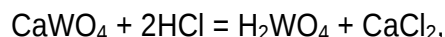
Переработка вольфрамитового концентрата

Переработку вольфрамитового концентрата обычно проводят путем спекания с содой и дальнейшим выщелачиванием полученного спека по схеме, приведенной на рис. 1. Из полученного раствора вольфрамата натрия после его очистки от примесей осаждают вольфрамат кальция путем добавления к раствору вольфрамата натрия раствора хлористого кальция по реакции



В результате протекания реакции в

осадок выпадает «искусственный шеелит», который в последующих операциях разлагают соляной кислотой с образованием осадка вольфрамовой кислоты по реакции



после этого полученную вольфрамовую кислоту тщательно отмывают от хлористого кальция, затем сушат и прокаливают до триоксида вольфрама [1, 8, 9].

В настоящее время наряду с традиционным способом переработки вольфрамитового концентрата существует множе-

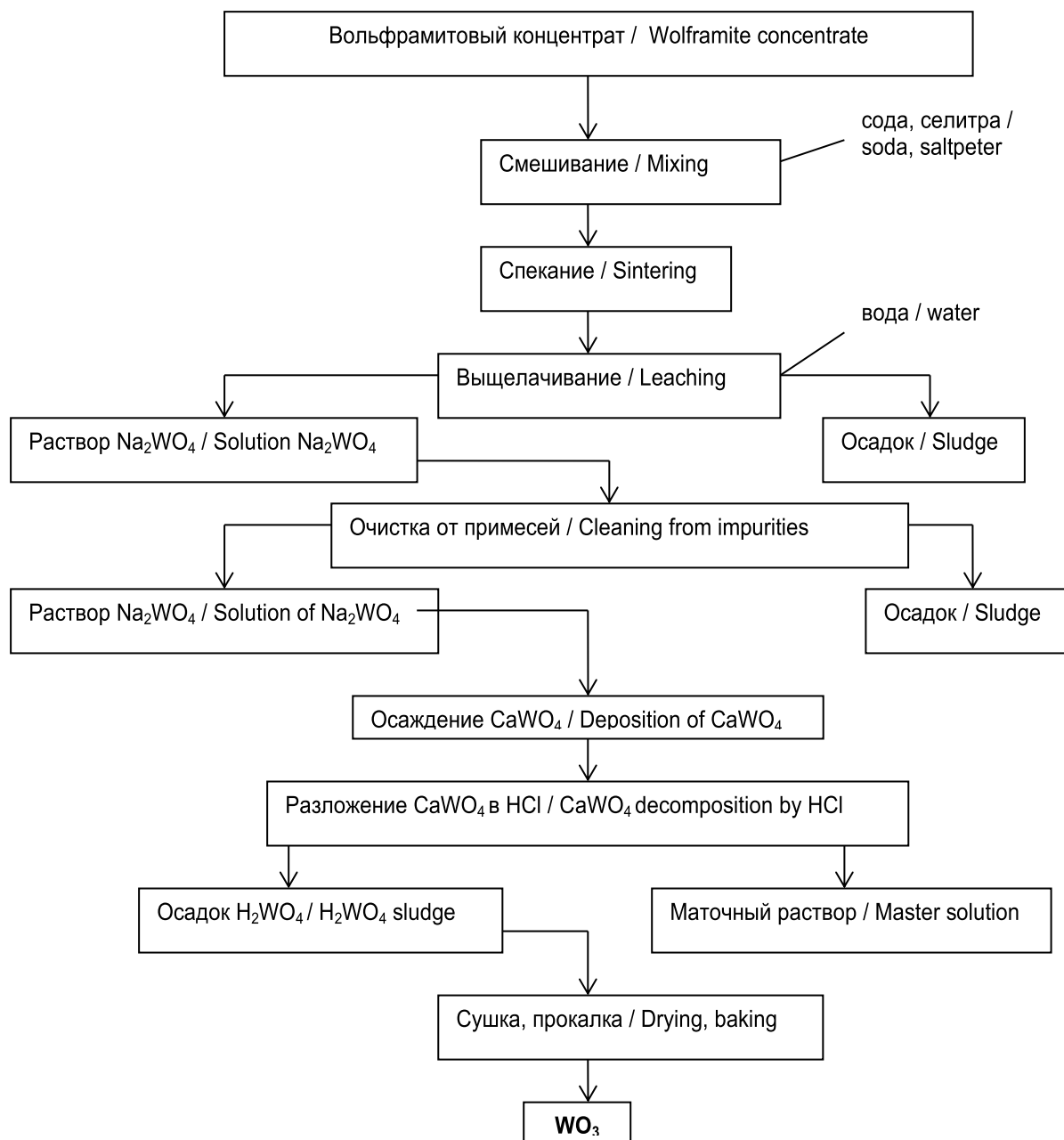


Рис. 1. Схема переработки вольфрамитового концентрата
Fig. 1. Flow diagram of wolframite concentrate processing

ство других способов, направленных в основном на упрощение технологической схемы переработки вольфрамита, например, известна возможность упрощения процесса с сокращением расхода реагентов при сохранении степени извлечения вольфрама и получении кондиционного по триоксиду вольфрама продукта. Для этого вольфрамитовый концентрат загружается в кварцевую лодочку, которая в свою очередь помещается в кварцевый реактор,

расположенный в печи. Затем печь нагревается до 1150°C и подается паровоздушная смесь, нагретая до той же температуры. Потом паровоздушная смесь, содержащая пары гидратированного триоксида вольфрама, направляется в систему конденсации и охлаждается до 600°C [10]. Также известен способ переработки вольфрамитовых и шеелитовых концентратов, позволяющий исключить операции смешивания измельченного концентрата с каль-



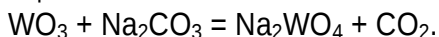
цинированной содой и выщелачивание водой [11]. По данному способу эти операции заменяются одной операцией сплавления концентрата с соответствующими добавками (железная руда и уголь в случае переработки шеелита и известь или известняк при переработке вольфрамита). В работе [12] описан способ переработки труднообогащаемых молибденовых руд по комбинированной технологической схеме, включающей получение некондиционных концентратов флотацией и переработку их методами электрохимического выщелачивания. По данной схеме некондиционный молибденовый концентрат подвергали электрохимическому выщелачиванию смесью хлористого натрия (250 г/л) и соды (100 г/л) при ж:т = 15:1 в течение 24 часов и

температуре 70°C.

Несмотря на то что известные способы имеют определенные преимущества по сравнению с традиционной схемой переработки вольфрамитового концентрата, они не находят промышленного применения ввиду невозможности переработки больших объемов концентрата за один технологический цикл. Поэтому необходима разработка такого способа, который позволит оптимизировать существующую технологическую схему и сохранить заданную производительность процесса, применяемого на производстве. С этой целью была проведена серия лабораторных исследований по переработке вольфрамитового концентрата.

Проведение лабораторных исследований по переработке вольфрамитового концентрата

Вольфрамитовый концентрат, химический состав которого приведен в таблице, смешивали с содой, углекислым калием и селитрой, также добавляли хвосты от выщелачивания спека – вольфрамовые отвалы в количестве 25 г на 100 г концентрата, для того, чтобы избежать полного расплавления шихты в процессе спекания. Однако при этом происходит снижение содержания вольфрама в шихте. Селитра бралась из расчета 2 г на 100 г концентрата. Обычно этого количества реагента достаточно для интенсификации окисления двухвалентного железа и марганца. Количество соды бралось с избытком – 50% по отношению к теоретически необходимому по реакции



Избыток соды при разложении вольфрамитового концентрата составляет, как правило, от 100 до 150%, поэтому для снижения этих значений к шихте добавляли углекислый калий как частичную замену соды. Это также позволило снизить температуру спекания с 800–900°C до 700°C, поскольку скорость взаимодействия компонентов вольфрамитового концентрата с углекислым калием при более низких температурах выше, чем с содой. Однако снижение температуры спекания до 700°C не позволило избавиться от такого компонента шихты, как вольфрамовые отвалы, поскольку образующийся вольфрамат натрия начинает плавиться при температуре порядка 696°C.

Химический состав вольфрамитового концентрата Chemical composition of wolframite concentrate

Сорт / Grade	WO ₃ , %	Массовая доля, % / Weight percent, %											Влага / Moisture
		MnO	SiO ₂	P	S	As	Sn	Cu	Mo	Pb	Sb	Bi	
1	65	18,3	6,2	0,06	0,8	0,08	0,18	0,2	0,1	0,21	0,22	0,24	2



В связи с этим необходимо было найти способ, позволяющий снизить температуру спекания с целью предотвращения расплавления вольфрамата натрия. Известно, что селитра может образовывать легкоплавкие расплавы ($t_{пл}$ 300–310°C) и имеет способность ассимилировать более тугоплавкие соли, в нашем случае кальцинированную соду, поэтому было принято решение использовать селитру в большем количестве. С целью определения оптимального ее количества в шихте был проведен ряд плавов.

В результате проведенных плавов было установлено, что содержание селитры в шихте в количестве менее 80 г на 100 г концентрата приводит к образованию вязкого расплава, что в свою очередь затрудняет взаимодействие компонентов шихты и снижает степень разложения вольфрамитового концентрата. При увеличении количества селитры свыше 120 г на 100 г концентрата степень извлечения вольфрама сохраняется, однако снижается производительность процесса из-за того, что снижается доля концентрата в шихте. На рис. 2 приведена зависимость извлечения вольфрама из спека в раствор от количества селитры в шихте. Из приведенной зависимости видно, что оптимальное количество селитры в шихте составляет 100 г на 100 г концентрата. Количество углекислого калия брали из расчета 2 г K_2CO_3

на 1 г Na_2CO_3 .

После определения требуемого количества селитры навеску концентрата массой 100 г смешивали с содой (45 г), углекислым калием (90 г) и селитрой (100 г) в фарфоровой ступке. Шихтование проводили в течение 25–30 мин. Спекание вольфрамитового концентрата проводили в течение двух часов при температуре 450–500°C в железном противне при периодическом перемешивании. Вначале сплавляли селитру с содой с образованием расплава, который использовали в качестве среды, обеспечивающей обменное взаимодействие концентрата с содой и углекислым калием. После спекания проводили охлаждение и измельчение полученного спека. Измельченный спек выщелачивали горячей водой при температуре 80–90°C в фарфоровом стакане при постоянном перемешивании в течение 40–50 мин. Горячую воду добавляли к спеку из расчета отношения т:ж = 1:4. После выщелачивания полученную пульпу отфильтровывали на вакуум-фильтре. После этого определяли концентрацию вольфрамата натрия. Для этого с помощью денсиметра измеряли плотность раствора Na_2WO_4 и по таблице плотности стандартных растворов вольфрамата натрия определяли концентрацию, которая при плотности 1,28 кг/м³ составила 25,46 % по массе.

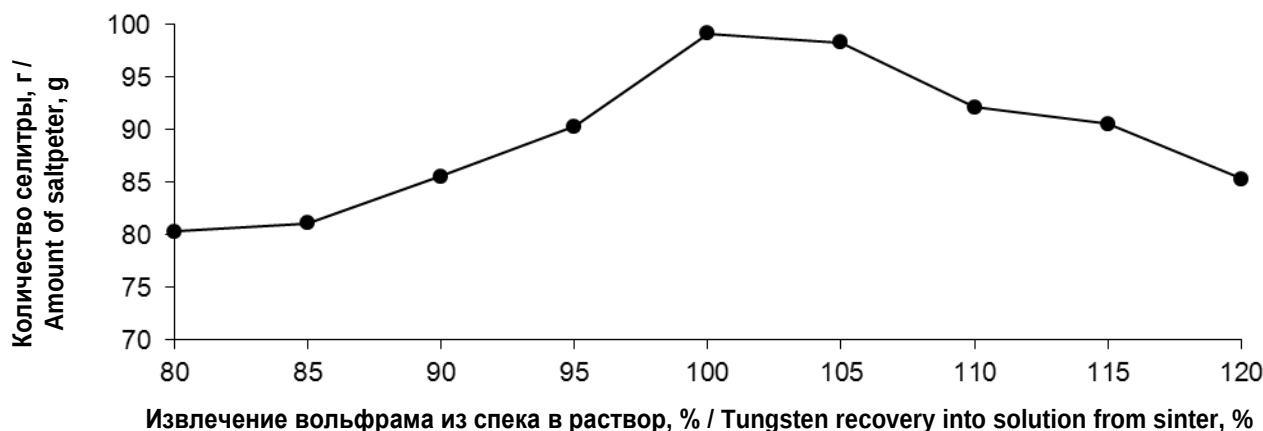
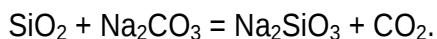


Рис. 2. График зависимости извлечения вольфрама из спека в раствор от количества селитры в шихте
Fig. 2. Dependency graph of tungsten recovery into solution from sinter on the amount of saltpeter in charge

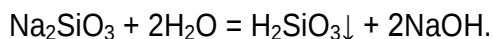


Примеси, присутствующие в концентрате, также взаимодействуют с содой. Примесь кремнезема взаимодействует с содой с образованием водорастворимого силиката по реакции

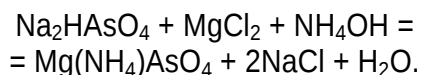
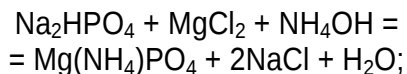


Фосфор и мышьяк также при взаимодействии с содой образуют водорастворимые фосфат и арсенат натрия. Таким образом, при выщелачивании водой в раствор переходят вольфрамат натрия, силикат натрия, фосфат и арсенат натрия.

Для очистки раствора от кремния проводили его нейтрализацию соляной кислотой до достижения pH = 7–8. После кипячения раствора в результате гидролиза силиката натрия выделяется кремниевая кислота:



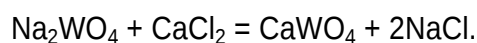
Очистку от фосфора и мышьяка проводили путем выделения из раствора малорастворимых аммонийно-магниевого солей по так называемой аммонийно-магнито-очистке, которая основана на осаждении из раствора малорастворимых $\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4$ и $\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{AsO}_4$ по реакциям:



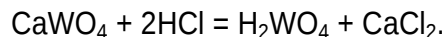
После очистки раствора от примесей необходимо было получить вольфрамовую кислоту. Это возможно сделать двумя способами. Во-первых, возможно непосредственное осаждение вольфрамовой

кислоты при добавлении раствора соляной кислоты. При этом способе выпадает мелкозернистая коллоидная вольфрамовая кислота, поэтому более распространенным является получение вольфрамовой кислоты через стадию образования «искусственного шеелита».

Осаждение «искусственного шеелита» проводили путем добавления к нагретому раствору вольфрамата натрия нагретого 20%-го раствора хлористого кальция. Количество хлористого кальция бралось с избытком 15% от необходимого по реакции



Полноту осаждения контролировали при помощи качественной реакции на вольфрамовую синь. Сущность метода подробно рассмотрена в работах [8, 9]. Полученный осадок вольфрамата кальция отфильтровывали и направляли на разложение соляной кислотой по реакции



Операцию разложения «искусственного шеелита» соляной кислотой проводили следующим образом. Концентрированную кислоту брали с избытком – 50% от теоретически необходимого количества по реакции, нагревали кислоту до 70–80°C в фарфоровой чашке и добавляли концентрированную азотную кислоту (10% от объема HCl). Затем при постоянном перемешивании добавляли в чашку небольшими порциями «искусственный шеелит». Полученную пульпу вольфрамовой кислоты отфильтровывали и промывали на вакуум-фильтре. Промытую вольфрамовую кислоту высушивали и прокаливали в муфельной печи при температуре 600°C в течение часа. В результате после удаления всей влаги получали мелкокристаллический порошок триоксида вольфрама с содержанием 99,8% WO_3 .



Заключение

Изучена возможность переработки вольфрамитового концентрата с исключением из состава шихты хвостов выщелачивания спека, снижающих содержание вольфрама в шихте. Определены оптимальные температурные условия проведения процесса спекания и состав шихты,

направляемой на спекание с целью получения вольфрамата натрия, из которого после выщелачивания и осаждения «искусственного шеелита» и последующего его разложения соляной кислотой удалось получить порошок триоксида вольфрама с содержанием 99,8% WO_3 .

Библиографический список

1. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. *Металлургия редких металлов*. М.: Metallurgia, 1991. 432 с.
2. Хантургаева Г.И. Получение трисульфида молибдена из бедных молибденовых концентратов // Вестник БГУ. Сер. 1. Химия. 2006. Вып. 3. С. 195–200.
3. Ryan W. Non-ferrous Extractive Metallurgy in United Kingdom // L. Institute of Mining and Metallurgy. 1968. P. 194–200.
4. Enshu P, Qinglin X. High calcium tungsten mineral decomposition method by means of normal pressure alkali boiling process. Patent of China, no. 1380429, 2002.
5. Giles D.J., Giles J.E. Process of Extracting Tungsten and Similar Metals from their Ores. Patent of USA, no. 1388857, 1921.
6. Jiajun K, Xinghui M, Jianping G. Processing of Calcium-Containing Tungstenic Ore. Patent of China, no. 86100031, 1986.
7. Пат. № 2465357, Российская Федерация, МПК C22B34/36, C22B3/12. Способ переработки вольфрамитового концентрата / Ю.А. Крюков, Б.В. Ларионов, Г.В. Сакович, С.В. Сысолятин; заявитель и
- патентообладатель ИПХЭТ СО РАН. № 2011126453; заявл. 27.06.2011, опублик. 27.10.2012, Бюл. № 30.
8. Бельский С.С. Переработка шеелитового концентрата с получением триоксида вольфрама // Вестник ИрГТУ. 2015. № 12 (107). С. 204–208.
9. Анфилогова Л.А., Надольский А.П. *Металлургия редких металлов: методические указания к выполнению лабораторных работ*. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. 32 с.
10. А. с. SU № 1668443, СССР, МПК C22B34/36. Способ переработки вольфрамитовых концентратов / С.А. Васильев, Е.Н. Кузнецова, В.А. Кругляков. № 4695877; заявл. 21.04.1989, опублик. 07.08.1991. Бюл. № 29.
11. А. с. SU № 50521, СССР, Класс 40а, 46. Способ переработки вольфрамитовых и шеелитовых концентратов / А.Я. Петровский. № 172582; заявл. 09.07.1935, опублик. 28.02.1937.
12. Хантургаева Г.И. Комбинированные технологии комплексной переработки труднообогатимых молибденовых и вольфрамовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Т. 14. № 12. С. 478–494.

References

1. Zelikman A.N., Korshunov B.G. *Metallurgiya redkih metallov* [Metallurgy of rare metals]. Moscow: Metallurgy Publ., 1991, 432 p. (In Russian)
2. Hannturgaeva G.I. Preparation of molybdenum trisulfide from poor molybdenum concentrates. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Buryat State University]. Series 1: Chemistry. 2006, vol. 3, pp. 195–200. (In Russian)
3. Ryan W. Non-ferrous Extractive Metallurgy in United Kingdom / L. Institute of Mining and Metallurgy. 1968, pp. 194–200.
4. Enshu P, Qinglin X. High calcium tungsten mineral decomposition method by means of normal pressure alkali boiling process. Patent of China, no. 1380429, 2002.
5. Giles D.J., Giles J.E. Process of Extracting Tungsten and Similar Metals from their Ores. Patent of USA, no. 1388857, 1921.
6. Jiajun K, Xinghui M, Jianping G. Processing of Calcium-Containing Tungstenic Ore. Patent of China, no. 86100031, 1986.
7. Kryukov Yu.A., Larionov B.V., Sakovich G.V., Sysojatin S.V. *Sposob pererabotki vol'framitovogo koncentrata* [Processing method of wolframite concentrate]. Patent RF, no. 2465357, 2012.
8. Bel'skij S.S. Scheelite concentrate treatment with the recovery of tungsten trioxide. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015. no 12 (107). pp. 204–208. (In Russian).
9. Anfilogova L.A., Nadol'skij A.P. *Metallurgiya redkih metallov: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornyh rabot* [Metallurgy of rare metals: Laboratory operations manual]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2003, 32 p. (In Russian).
10. Vasil'ev S.A., Kuznecova E.N., Krugljakov V.A.



Sposob pererabotki vol'framitovykh koncentratov [Processing method of wolframite concentrates]. Patent USSR, no. 1668443, 1991.

11. Petrovskij A.YA. *Sposob pererabotki vol'framitovykh i sheelitovykh koncentratov* [Processing method of wolframite and scheelite concentrates]. Patent USSR, no. 50521, 1937.

12. Hanturgaeva G.I. *Kombinirovannye tekhnologii*

kompleksnoj pererabotki trudnoobogatimyykh molibdenovykh i vol'framovykh rud [Combined technologies of complex processing of refractory molybdenum and tungsten ores]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2014, no. 6, pp. 168–177. (In Russian)

Критерии авторства

Бельский С.С. полностью подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Belskii S.S. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 13.11.2017 г.

The article was received 13 November 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 628.16.087

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-194-201>

ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ МАРГАНЦА ИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ВОД ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

© В.И. Дударев¹, Л.А. Минаева², Е.Г. Филатова³, В.И. Саламатов⁴

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Электрофлотационное извлечение марганца из производственных вод позволяет эффективно очищать воду и использовать ее в замкнутой системе водоснабжения за счет высокой степени извлечения катионов металла. **МЕТОДЫ.** Комплексная переработка техногенных марганецсодержащих гидроминеральных ресурсов обуславливает возможность получения дополнительной дефицитной продукции из нерудной части отходов. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В работе показана оптимизация электрокоагуляционного извлечения марганца из производственных вод обогатительного комбината. Шлам, получаемый в результате очистки промышленных растворов, представляет собой ценный материал, состоящий в основном из гидроксидов алюминия (III), железа (III) и марганца (II). В результате несложной переработки из него могут быть извлечены широко используемые смешанные коагулянты для очистки воды и дефицитный диоксид марганца, применяемый в производстве химических источников тока. **ВЫВОДЫ.** В результате электрохимической очистки и комплексной переработки образующегося электрокоагуляционного шлама может быть получено более 30 т диоксида марганца и 150 т смешанных коагулянтов для очистки воды.

Ключевые слова: электрокоагуляция, извлечение марганца, производственные воды.

Формат цитирования: Дударев В.И., Минаева Л.А., Филатова Е.Г., Саламатов В.И. Электрокоагуляционное извлечение марганца из производственных вод обогатительного комбината // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 194–201. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-194-201

ELECTROCOAGULATION EXTRACTION OF MANGANESE FROM PROCESSING PLANT INDUSTRIAL WATER

V.I. Dudarev, L.A. Minaeva, E.G. Filatova, V.I. Salamatov

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. Electroflotation recovery of manganese from industrial water allows to treat water effectively and use it in a closed water supply system as it provides a high extraction degree of metal cations. **METHODS.** Integrated treatment of technogenic manganese-containing hydromineral resources provides the possibility to obtain additional scarce products from the non-metallic parts of waste. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The paper shows the optimization of electrocoagulation extraction of manganese from the industrial waters of a processing plant. Sludge resulting from the industrial solution treatment is a valuable material that mainly consists of hydroxides of aluminum(III), iron(III) and manganese(II). Its simple processing allows to extract mixed coagulants widely used for water purification and a scarce manganese dioxide used in the production of chemical sources of current. **CONCLUSIONS.** Electrochemical puri-

¹Дударев Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры общеобразовательных дисциплин, e-mail: vdudarev@istu.edu

Vladimir I. Dudarev, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of General Education Disciplines, e-mail: vdudarev@istu.edu

²Минаева Людмила Анатольевна, старший преподаватель кафедры химической технологии неорганических веществ и материалов, e-mail: llyda@yandex.ru

Lyudmila A. Minaeva, Senior Lecturer of the Department of Chemical Technology of Inorganic Substances and Materials, e-mail: llyda@yandex.ru

³Филатова Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и пищевой технологии, e-mail: efila@list.ru

Elena G. Filatova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Food Technology, e-mail: efila@list.ru

⁴Саламатов Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, e-mail: auto@istu.edu

Viktor I. Salamatov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Machine-Building Technologies and Materials, e-mail: auto@istu.edu



fication and integrated processing of formed electrocoagulation sludge allows to obtain more than 30 tons of manganese dioxide and 150 tons of mixed coagulants for water purification.

Key words: electrocoagulation; extraction of manganese, industrial waters

For citation: Dudarev V.I., Minaeva L.A., Filatova E.G., Salamatov V.I. Electrocoagulation extraction of manganese from processing plant industrial water. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 194–201. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-194-201

Введение

Добыча и переработка полезных ископаемых является одним из стратегических направлений экономики России [1]. Однако рост потребления природных ресурсов сопровождается мощным антропогенным воздействием на окружающую среду [2]. Для всех способов разработки железорудных месторождений характерно воздействие на биосферу, затрагивающее практически все ее элементы: недра, землю, водный и воздушный бассейны, растительный и животный мир [3]. Специфика добычи и обогащения руд заключается в извлечении и переработке огромных масс горных пород, из которых используется лишь выборная часть, все остальное накапливается в виде сбросов и отходов, загрязняя окружающую среду [4]. Особенно сильно загрязняют окружающую среду растворы шахтного, рудничного и карьерного водоотливов, которые зачастую сбрасываются в неочищенном виде. При этом ухуд-

шается качество водных источников, изменяются гидрогеологические и гидрологические условия в районе месторождения. Ресурсы, являясь объектом и операционным базисом горного производства, подвергаются наибольшему воздействию и не обладают способностью к естественному возобновлению, поэтому их охрана должна предусматривать обеспечение научно-обоснованной и экономически оправданной полноты и комплексности использования [5]. Электрофлотационное извлечение марганца из производственных вод, как было показано ранее в работе [6], позволяет эффективно очищать воду и использовать ее в замкнутой системе водоснабжения за счет высокой степени извлечения катионов металла. С другой стороны, такая переработка техногенных марганецсодержащих гидроминеральных ресурсов позволяет получать дополнительную дефицитную продукцию из нерудной части отходов.

Цель и методы исследования

На сегодняшний день технологии переработки техногенных вод горно-обогатительных комбинатов (ГОК) не предусматривают специальную очистку воды и тем более целевое извлечение компонентов в виде кондиционного сырья. В настоящее время на ГОКах страны для доочистки производственных водных растворов от катионов металлов, содержание которых в несколько раз превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК), в основном используется недостаточно эффективный и высокореагентный метод известкования. Этот метод не дает возможности селективно разделять содержимое

растворов, так как pH среды, при котором начинается процесс осаждения ионов переходных металлов, находится в достаточно близких пределах, что непригодно для селективного извлечения, например, ионов марганца (II). В связи с этим представляет интерес разработка ресурсосберегающей технологии переработки техногенных марганецсодержащих гидроминеральных ресурсов с получением дополнительной готовой продукции из нерудной части отходов.

Технические характеристики электрокоагуляционной установки, использованной нами при проведении исследований, приведены в табл. 1.



Таблица 1

Технические характеристики электрокоагулятора

Table 1

Technical characteristics of the electrocoagulator

Параметр / Parameter	Значение / Value
Производительность, л/ч / Performance, l/h	25–100
Ширина, м / Width, m	0,250
Высота, м / Height, m	0,250
Длина, м / Length, m	0,500
Скорость движения воды / Water velocity	не менее 0,03 м/с / not less than 0.03 m/s
Рабочее напряжение постоянного тока, В / DC operation voltage, V	20–22
Плотность тока, А/м ² / Current density, A/m ²	10–25
Рабочий ток, А / Operating current, A	0,008–0,020
Площадь алюминиевых анодов, м ² / Area of aluminum anodes, m ²	0,02–0,08
Расстояние между электродами, м / Distance between electrodes, m	0,005–0,020
Тип источника питания – выпрямитель, реверсируемый со стабилизацией по току / Power Supply Type – reversible rectifier with current stabilization	U _{макс/макс} = 24 В; I _{макс/макс} = 1200 А
Марка выпрямителя / Rectifier brand	ТЕР1–1200/24Т–2
Мощность выпрямителя, кВт / Rectifier power, kW	30

Технические показатели и параметры электрокоагуляционной ячейки с алюминиевыми анодами и катодами приведены в табл. 2.

Количество извлекаемых ионов марганца рассчитывали по формуле

$$A = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}})}{\Delta m_{\text{Al}}} \cdot V,$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация ионов марганца в модельной воде, мкг/мл; $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация ионов марганца в воде, мкг/мл; V – объем воды в электролитической ячейке, мл; Δm_{Al} – изменение массы алюминиевого анода, соответствующее конкретному промежутку времени проведения процесса электрокоагуляции, мг.

Таблица 2

Технические показатели и параметры работы электрокоагуляционной установки

Table 2

Technical indicators and performance parameters of the electrocoagulation unit

Объем установки, 10 ⁻⁴ м ³ / Installation volume, 10 ⁻⁴ м ³	Площадь алюминиевых анодов, 10 ⁻⁴ м ² / Area of aluminum anodes, 10 ⁻⁴ м ²	Расстояние между электродами, м / Distance between electrodes, m	Плотность тока, А/м ² / Current density, A/m ²	Сила тока, 10 ⁻³ А / Current strength, 10 ⁻³ А	Напряжение, В / Voltage, V
10	8–16	0,01	10–25	8–20	12



Концентрацию ионов марганца (II) в модельных растворах и промышленных водах устанавливали спектрофотометрическим методом анализа на спектрофотометре ПЭ-54008 [7]. Определение проводили следующим образом: из анализируемого электролита отбирали пробу 2,0 мл в мерную колбу на 50 мл, вводили 2,0 мл раствора серной кислоты (1:4), 1,0 мл 0,01 моль/л раствора азотнокислого серебра и 2,0 мл 25% раствора $\text{NH}_4\text{S}_2\text{O}_8$, добавляли дистиллированную воду до метки. Приготовленный раствор фотометрировали через 10 мин относительно раствора сравнения (H_2O) при $\lambda_{\text{max}} = 540$ нм. Для построения градуированного графика в мерные колбы на 50 мл вводили по 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 и 7,0 мл стандартного раствора с концентрацией марганца 10 мкг/мл. В каждую колбу добавляли по 2,0 мл раствора серной кислоты (1:4), 1,0

мл 0,01М раствора азотнокислого серебра и 2,0 мл 25% раствора $\text{NH}_4\text{S}_2\text{O}_8$, добавляли дистиллированную воду до метки. На водяной бане каждую колбу нагревали в течение 3–5 мин. Через 15–20 мин стандартные растворы фотометрировали относительно воды и строили градуированный график $A = f(c)$.

Концентрацию ионов марганца (II) рассчитывали по уравнению

$$A = 1,1422 \cdot c - 0,0707 \quad (R^2 = 1).$$

Для получения достоверной информации о значениях равновесных концентраций марганца (II) в исследуемых растворах проводили от трех до пяти параллельных анализов атомно-абсорбционным методом на анализаторе «Квант-2А».

Результаты исследования

Экспериментальные данные по определению остаточной концентрации ионов марганца (II) в модельных производственных водах и их статистическая обра-

ботка, произведенная с помощью стандартного пакета программ Excel, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Экспериментальные данные по определению остаточной концентрации ионов марганца ($C_{\text{исх}} (\text{Mn}^{2+}) = 6,7$ мг/л)

Table 3

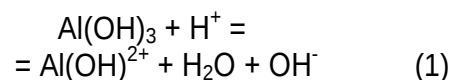
Experimental data on manganese ions residual concentration determination ($C_{\text{original}} (\text{Mn}^{2+}) = 6.7$ mg/l)

Время проведения электролиза t , мин / Electrolysis duration t , min	$C (\text{Mn}^{2+})$, мг/л / mg/l	$C_{\text{ср}} (\text{Mn}^{2+})$, мг/л / mg/l	Относительное квадратичное отклонение S_r / Relative quadratic deviation S_r	Доверительный интервал σ / Confidence interval σ	Относительная погрешность, % / Relative error, %
0	8,012 7,999 8,009	8,0067	0,0003	0,0027	2,25
5	4,249 4,119 4,197	4,1883	0,0024	0,0099	2,85
10	4,031 4,001 4,027	4,0197	0,0021	0,0084	2,65
15	3,899 3,872 3,886	3,8823	0,0011	0,0042	2,93



Из данных табл. 3 следует, что относительная погрешность при определении остаточной концентрации исследуемых растворов, содержащих ионы марганца (II), не превышала 3%. Электрокоагуляционную обработку водных растворов проводили в течение 30 мин. При этом экспериментально установлено, что в течение первых 15 мин электрокоагуляционного процесса происходит снижение концентрации ионов марганца (II) на 60–70%, а в течение последних 15 мин – не более чем на 5–9%. Следовательно, при извлечении ионов марганца (II) из сточных вод электрокоагуляционную обработку воды целесообразно проводить не более 15 мин.

Одним из оптимальных условий электрокоагуляционного процесса извлечения ионов марганца (II) из промышленной сточной воды является pH от 5,8 до 6,0. Однако в ходе проведения электрохимического процесса с алюминиевыми анодами в интервале pH примерно от 4,5 до 8,5 наблюдается увеличение pH среды. Снижение концентрации катионов водорода H^+ происходит за счет того, что в слабокислой и нейтральной области преобладают положительно заряженные гидроксокомплексы алюминия:



За счет смещения равновесия, согласно принципу Ле-Шателье, в растворе будут накапливаться гидроксид-ионы, в результате чего pH исследуемой системы повышается. Увеличение pH среды ускоряет старение коагулянта, то есть самопроизвольно начинает протекать процесс, направленный в сторону увеличения пассивности системы в отношении поверхностных явлений.

Изотермы, полученные при адсорбции растворенных веществ на активном гидроксиде алюминия $Al(OH)_3$, имеют ступенчатый характер [8]. Это объясняется увеличением доступности внутренней поверхности адсорбента вследствие пептизации гидроксида алюминия, при этом адсорбируемость ионов марганца (II) будет тем выше, чем сильнее ассоциированы ионы, образующие мицеллу. На основании полученных экспериментальных данных по адсорбции ионов марганца (II) рассчитали расход алюминия в граммах, необходимый для извлечения 1 г ионов марганца (II) из сточной воды, и количество электричества по закону Фарадея (табл. 4).

Таблица 4

Расход алюминия и электричества

Table 4

Consumption of aluminum and of electricity

pH	Масса Al, г, для удаления 1 г марганца / Weight of Al, g, to remove 1 g of manganese	Количество электричества, А·ч / Amount of electricity, A·h
3,5	16,4	48,8
3,8	15,2	45,1
4,1	14,1	41,9
4,5	11,4	34,0
5,4	5,4	16,2
5,5	4,3	12,7
5,8	4,0	12,0
6,0	4,2	12,5
6,6	5,2	15,6
6,9	6,0	17,9

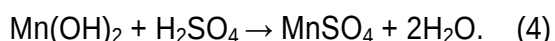
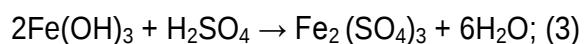
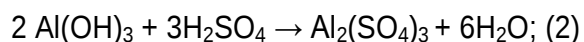


Из представленных данных видно, что минимальный расход алюминия при $\text{pH} = 5,8$ составляет 4,0 г для удаления 1 г ионов марганца (II), при этом расход электричества соответствует 12,0 А·ч.

При одном и том же отклонении потенциала алюминиевого электрода от равновесного значения результирующая плотность тока будет тем больше, чем выше ток обмена. При этом ток обмена зависит от природы электрохимической реакции, материала электрода и состава раствора. В нашем случае ток обмена составил 4,0 мА, а оптимальным условием проведения электрокоагуляционного процесса с целью извлечения ионов марганца (II) явилась плотность тока 1,6 мА/см². Установлено также, что с ростом температуры величина адсорбционного извлечения марганца увеличивается. Данный факт можно объяснить увеличением скорости процесса коагуляции гидроксида алюминия и образованием большего количества коагулянта, что в конечном итоге и приводит к увеличению адсорбции с ростом температуры. Эти результаты согласуются с предполагаемым механизмом извлечения ионов марганца (II) с использованием генерируемого гидроксида алюминия [8].

Электрокоагуляционный шлам, получаемый в результате очистки промышленных растворов, представляет собой ценный материал, состоящий в основном из гидроксидов алюминия (III), железа (III) и марганца (II). В результате несложной переработки из него могут быть получены широко используемые смешанные коагулянты для очистки воды и дефицитный диоксид марганца, применяемый в производстве химических источников тока.

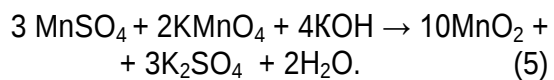
Основные процессы, которые предлагаются нами для переработки шлама, связаны с растворением осадка в разбавленной серной кислоте:



Полученный при этом раствор отделяется от нерастворимого осадка фильтрованием и используется для получения товарной продукции. Как видно по стехиометрическим коэффициентам уравнения реакции (2), на 1 моль гидроксида алюминия потребуется 1,5 моль серной кислоты, в результате протекания реакции получится ½ моль сульфата алюминия. В пересчете на массовое соотношение из 1 т гидроксида алюминия можно получить 1,78 т сульфата алюминия. Согласно реакции (3) на 1 моль гидроксида железа ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) требуется ½ моль серной кислоты, получается 1 моль сульфата железа. В пересчете на массовое соотношение из 1 т гидроксида железа можно получить 1,57 т сульфата железа. Смесь сульфатов алюминия и железа является комбинированным коагулянт, который с успехом используется для очистки воды [9].

В соответствии с реакцией (4) на 1 моль гидроксида марганца ($\text{Mn}(\text{OH})_2$) требуется 1 моль серной кислоты, при этом образуется 1 моль сульфата марганца. Таким образом, согласно расчетам, из 1 т гидроксида марганца может быть получено 1,69 т сульфата марганца. При обработке раствора перманганатом калия происходит осаждение диоксида марганца, который отделяется от раствора коагулянтов обычным фильтрованием.

Взаимодействие сульфата марганца (MnSO_4) с перманганатом калия протекает по следующей реакции:



В результате реакции (5) из 3 моль сульфата марганца образуется 10 моль диоксида марганца. В пересчете на массовое соотношение из 1 т сульфата марганца может быть получено 1,93 т осадка – диоксида марганца. После фильтрации и сушки осадка может быть получен готовый промышленный продукт – диоксид марганца – в качестве активной массы для наполнения



гальванических элементов⁵. Выпаривание оставшегося раствора даст возможность получения промышленного смешанного ко-

агулянта из сульфатов алюминия (III) и железа (III), соответствующего ГОСТ 51642-2000⁶.

Заключение

Таким образом, учитывая общую производительность промышленных водоотливов, например, Коршуновского ГОКа, где среднегодовое содержание ионов марганца (II) сохраняется в пределах 0,12–0,20 мг/дм³, а общее содержание в водоотливах ионов железа – 0,10–0,20 мг/дм³ [10], в ре-

зультате электрохимической очистки и комплексной переработки образующегося электрокоагуляционного шлама может быть получено более 30 т диоксида марганца и 150 т смешанных коагулянтов для очистки воды.

⁵ГОСТ 25823–83. Марганца двуокись для химических источников тока. Технические условия. Введен 1985-01-01. М.: Издательство стандартов, 1997 / GOST 25823–83. Manganese dioxide for chemical sources of current. Technical conditions. Introduced 1 January 1985. Moscow: Publishing Standards, 1997.

⁶ГОСТ 51642-2000. Коагулянты для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Общие требования и метод определения эффективности. Введен 2001-07-01. М.: Издательство стандартов, 2000 / GOST 51642-2000. Coagulants for utility and drinking water supply. General requirements and the method of efficiency determination. Introduced 1 July 2001. Moscow: Publishing Standards, 2000.

Библиографический список

1. Цивадзе А.Ю., Фомкин А.А. И химия, и жизнь // Вестник Российской академии наук. 2007. Т. 77. № 6. С. 551–555.
2. Fomkin A.A., Tsivadze A.Y., Shkolin A.V., Mukhin V.M., Dudarev V.I. Carbon adsorbents used for gold recovery technology with cyanide // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2014. Vol. 50. No. 6. P. 689–693.
3. Dudareva G.N., Nguen A.T.N., Syrykh Y.S., Petukhova G.A. Adsorption of nickel(II) ions on carbon adsorbents // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2013. Т. 49. No. 4. P. 413–420.
4. Васильева И.Е., Пожидаев Ю.Н., Власова Н.Н., Воронков М.Г., Филипенко Ю.А. Сорбционно-атомно-эмиссионное определение золота, платины и палладия в горных породах и рудах с использованием сорбента ПСТМ-3Т // Аналитика и контроль. 2010. Т. 14. № 1. С. 16–24
5. Tsivadze A.Y., Guryanov V.V., Petukhova G.A. Preparation of spherical activated carbon from furfural, its properties and prospective applications in medicine and the national economy // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2011. Vol. 47. No. 5. P. 612–620.
6. Дударев В.И., Баранов А.Н., Филатова Е.Г., Минаева Л.А. Деманганизация сточных вод электрохимическим способом // Вестник ИргТУ. 2014. № 3. С. 124–127.
7. Марченко З. Фотометрическое определение элементов. М.: Мир, 1971. 502 с.
8. Филатова Е.Г., Дударев В.И. Оптимизация электрокоагуляционной очистки сточных вод гальванических производств. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2013. 140 с.
9. Бабенков Е.Д. Воду очищают коагулянты. М.: Знание, 1983. 64 с.
10. Кравчук О.Э., Абаринова Н.Г., Вертянкина О.А. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Иркутской области за 2012 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Соча-вы СО РАН, 2013. 337 с.

References

1. Civadze A.Ju., Fomkin A.A. Either Chemistry and Life. Vestnik Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of Russian Academy of Sciences]. 2007, vol. 77, no. 6, pp. 551–555. (In Russian)
2. Fomkin A.A., Tsivadze A.Y., Shkolin A.V., Mukhin V.M., Dudarev V.I. Carbon adsorbents used for gold recovery technology with cyanide. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2014, vol. 50, no. 6, pp. 689–693.
3. Dudareva G.N., Nguen A.T.N., Syrykh Y.S., Petukhova G.A. Adsorption of nickel(II) ions on carbon adsorbents. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2013, vol. 49, no. 4, pp. 413–420.
4. Vasil'eva I.E., Pozhidaev Ju.N., Vlasova N.N., Voronkov M.G., Filipchenko Ju.A. Sorption-atomic-emission determination of gold, platinum and palladium



in rocks and ores using sorbent PSTM-3T. *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control]. 2010. vol. 14, no. 1, pp. 16–24. (In Russian)

5. Tsivadze A.Y., Guryanov V.V., Petukhova G.A. Preparation of spherical activated carbon from furfural, its properties and prospective applications in medicine and the national economy. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2011, vol. 47, no. 5, pp. 612–620.

6. Dudarev V.I., Baranov A.N., Filatova E.G., Minaeva L.A. Electrochemical methods of sewage demanganisation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 3, pp. 124–127. (In Russian)

7. Marchenko Z. *Fotometricheskoe opredelenie jelementov* [Photometric identification of elements]. M.: Mir

Publ., 1971, 502 p. (In Russian)

8. Filatova E.G., Dudarev V.I. *Optimizacija jelektrokoaguljacionnoj ochistki stochnyh vod gal'vanicheskikh proizvodstv* [Optimization of galvanic plant waste water electrocoagulation treatment]. Irkutsk: Irkutsk state university Publ., 2013. 140 p. (In Russian)

9. Babenkov E.D. *Vodu ochishhajut koagulyanty* [Coagulants purifying water]. M.: Znanie Publ., 1983. 64 p. (In Russian)

10. Kravchuk O.E., Abaranova N.G., Vertyankina O.A. *Gosudarstvennyj doklad o sostojanii i ohrane okruzhajushhej sredy Irkutskoj oblasti za 2012 g.* [State report on the state and protection of the Irkutsk region environment in 2012]. Irkutsk: Publishing House of the Sochava Institute of Geography SB RAS. 2013. 337 p. (In Russian)

Критерии авторства

Дударев В.И., Минаева Л.А., Филатова Е.Г., Саламатов В.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Dudarev V.I., Minaeva L.A., Filatova E.G., Salamatov V.I. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 24.10.2017 г.

The article was received 24 October 2017



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.86.032:62-526

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-202-208>

СПОСОБ БУКСИРОВКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГАБАРИТНОГО БУКСИРОВЩИКА

© Д.Е. Дьяков¹

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Российская Федерация, 394000, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а.

РЕЗЮМЕ. **ЦЕЛЬ** работы в данном направлении – развитие сети аэродромных малогабаритных устройств дистанционного управления. **МЕТОДЫ.** Учитывая схожесть работы колесных тягачей и дорожно-строительной техники, применена известная методика расчета основных показателей работы колесных движителей в тяговом режиме. Для оценки возможностей разработанного малогабаритного буксировщика и проверки адекватности выбранной методики проведены натурные испытания и сравнительный анализ полученных экспериментальных и теоретических тяговых характеристик. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Предложен новый способ буксировки воздушных судов при помощи малогабаритного буксировщика с дистанционным управлением, позволяющий достичь максимального технико-экономического результата. Загрузка передней стойки на раму буксировщика позволяет исключить использование дополнительного балласта для буксировки и экономить топливо при холостом пробеге тягача при обеспечении полетов авиации. **ВЫВОДЫ.** Предлагаемый способ, реализуемый при помощи малогабаритного буксировщика с дистанционным управлением, имеет ряд преимуществ перед штатными средствами буксировки.

Ключевые слова: воздушное судно, малогабаритный буксировщик, дистанционное управление, колесный движитель.

Формат цитирования: Дьяков Д.Е. Способ буксировки воздушных судов с использованием малогабаритного буксировщика // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 202–208. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-202-208

METHOD OF AIRCRAFT TOWING USING A SMALL-SIZED TOW

D.E. Diakov

Military Educational Scientific Center of Military Air Forces “Military and Air Academy
named after the Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”,

54a Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394000, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of works in this direction is development of a network of small remote control airdrome devices. **METHODS.** The known calculation methods of the main operation performances of wheeled running gear in a traction mode are used taking into account the operation similarity of wheeled haul tracks and road construction machinery. The capabilities of the developed small-sized tow and the adequacy of the chosen method are estimated and tested in the full-scale tests with the use of the comparative analysis of the obtained experimental and theoretical traction characteristics. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** A new aircraft towing method using a small remote control tow is proposed. It allows to achieve a maximum technical and economic result. Loading of the nose gear on the towing tractor frame eliminates the use of the additional ballast for towing and saves fuel at the idle run of the towing machine in aircraft maintenance. **CONCLUSIONS.** The proposed towing method using a small remote control tow has a number of advantages over the regular means of towing.

Keywords: aircraft, small-sized tow, remote control, wheeled running gear

For citation: Diakov D.E. Method of aircraft towing using a small-sized tow. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 202–208. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-202-208

¹Дьяков Денис Евгеньевич, адъюнкт кафедры автомобильной подготовки, e-mail: snooker646@rambler.ru
Denis E. Diakov, Postgraduate of the Department of Automotive Training, e-mail: snooker646@rambler.ru



Введение

В настоящее время одним из решающих факторов успешного выполнения боевых задач является грамотная, безаварийная эксплуатация авиационной техники, что позволяет обеспечить безопасность и регулярность полетов. В нашей стране на военных аэродромах буксировка воздушных судов (ВС) с мест стоянок на площадки подготовки к вылету и обратно осуществляется с помощью колесных тягачей – автомобилей повышенной проходимости общего применения, выпускаемых серийно, с колесной формулой 4×4, 6×6 или 8×8. Для транспортирования ВС колесными тягачами используются унифицированные буксировочные водила, которые имеют сцепное устройство с передней стойкой шасси ВС и буксирным крюком тягача. Конструкция буксировочных водил может быть различна и постоянно модифицируется [1].

Ранее использовался способ буксировки воздушных судов, реализуемый при помощи малогабаритного устройства для буксирования ВС [2], которое содержит

буксировочную тележку, двигатель с редуктором, рулевой механизм, ведущий ролик с возможностью съема и привод управляемых колес. Данный способ имеет ряд существенных недостатков, таких как ограничение по классу буксируемых ВС, низкие тягово-сцепные качества устройства, особенно на мокрой или скользкой опорной поверхности из-за проскальзывания ведущего ролика по отношению к колесу передней стойки воздушного судна, что снижает возможность применения этого способа в различных климатических условиях.

Авторами настоящей статьи ведется работа по созданию малогабаритных устройств, реализующих максимальную силу тяги по сцеплению с опорной поверхностью, имеющей различные коэффициенты сцепления.

Задачей данного исследования является усовершенствование современных образцов специальной аэродромной техники в целях повышения ее функциональных возможностей.

Преимущества разрабатываемого устройства

В рамках проводимого исследования немаловажным является анализ отклонения тягового усилия в корреляционной зависимости от нормальных реакций ведущих колес при работе предлагаемого буксировщика под нагрузкой весом, приходящимся на переднюю стойку буксируемого ВС при его движении.

Дальнейшие исследования позволили найти оптимальное техническое решение малогабаритного устройства для буксирования ВС, а именно, данное устройство имеет: несущую раму, двигатель (силовой агрегат) с редуктором, гидравлический насос с распределителем, поворотную ось, рампу механизма подъема и фиксации колес передней стойки ВС, гидравлические цилиндры, колеса передней стойки ВС, фиксатор колеса передней стойки ВС, направляющие рампы с прорезями, механизм подъема и фиксации колес

передней стойки ВС, упор рампы для фиксации колес стойки ВС [3].

К недостаткам данного устройства следует отнести высокую трудоемкость процесса буксировки, поскольку при управлении буксировщиком водитель не обеспечивает полного контроля над буксируемым средством, при этом вес от передней стойки ВС распределяется по осям буксировочного устройства неравномерно, что влечет быстрый износ и выход из строя частей и механизмов конструкции. Кроме того, на водителя-оператора при нахождении его в кабине буксировщика неблагоприятное воздействие оказывает вибрация при транспортировке ВС.

В настоящее время ведется работа по созданию малогабаритного буксировщика ВС дистанционного управления с целью расширения его функциональных возможностей, в том числе улучшения маневрен-



ности [4]. Необходимо обеспечить максимальную эффективность работы устройства при его минимальных размерах и недостаточности парковочного пространства. Унифицированная модель буксировщика должна позволить использовать его для всех типов самолетов, достичь полного ви-

зуального контроля над всеми частями самолета при буксировке, исключая возможность столкновения. А также нужно свести к минимуму или полностью исключить воздействие на оператора вибрационных нагрузок.

Методика реализации способа буксировки при помощи малогабаритного буксировщика с дистанционным управлением

Предлагаемый способ буксировки реализуется использованием малогабаритного буксировщика с дистанционным управлением (рис. 1), предназначенного для наземной буксировки воздушных судов и включающего рампу механизма подъема и фиксации колес передней стойки воздушного судна и фиксатор колес передней стойки воздушного судна, которые позволяют осуществить подъем и фиксацию передней стойки воздушного судна для осуществления буксировки.

Отличительной особенностью предлагаемого способа является то, что весь процесс управления буксировкой осуществляется оператором на расстоянии с пульта дистанционного управления (рис. 2), что позволяет осуществлять полный визуальный контроль над буксировщиком и воздушным судном.

Данный способ буксировки позволяет повысить тяговое усилие по сцеплению с опорной поверхностью ведущих колес малогабаритного буксировщика в начальный период буксировки самолетов и при движении по аэродромному покрытию с низким коэффициентом сцепления, уменьшить пробуксовку колес, значительно сократить трудозатраты, исключить воздействие вибрации на оператора, уменьшить расход топлива.

Малогабаритный буксировщик ВС с дистанционным управлением, предназначенный для наземной буксировки ВС, включает: несущую раму 1, силовой агрегат 2, трансмиссию 3, приемник сигнала 4, ведущие колеса 5, микроконтроллер управления 6, источник питания 7, рампу механизма подъема и фиксации колес передней

стойки ВС 8, поворотную ось 9, упор для фиксации и центровки колес передней стойки ВС 10, колеса передней стойки ВС 11, гидравлический насос с распределителем 12, прижимные гидроцилиндры механизма фиксации колес передней стойки ВС 13, фиксатор колес передней стойки ВС 14, разъем резервного канала подключения кабеля к пульту управления буксировщиком 15, блок управления силовым агрегатом 16, блок управления гидрораспределителем 17, гидроцилиндры механизма подъема 18, сервопривод управляемых колес 19, вилку управляемых колес 20, управляемые колеса 21, пульт дистанционного управления 22 содержащий джойстик ускорения и изменения направления движения 23, тумблер переключения передач 24, тумблер пуска и остановки силового агрегата 25, разъем резервного канала подключения кабеля к пульту управления буксировщиком 26, тумблер управления работой механизма фиксации 27, джойстик управления подъема и опускания рампы 28 [5].

Устройство работает следующим образом. Оператор при помощи пульта управления 22 подает команды на управление устройством, при этом изначально осуществляет пуск силового агрегата 2 при помощи тумблера 25, выбирает необходимую передачу работы трансмиссии 3, используя тумблер 24 с предварительно открытым механизмом фиксации колес передней стойки ВС, реализует подъезд к ВС до соприкосновения с упором для фиксации и центровки колес передней стойки ВС 10, убедившись в правильном расположении колес передней стойки 11 на рампе механизма подъема и фиксации 8. Далее



оператор осуществляет фиксацию колеса передней стойки ВС на рампе 8 при помощи тумблера 27, затем выполняет подъем передней стойки ВС, при этом джойстик управления подъема и опускания рампы 28 переводится в соответствующее положение, подающее команду в блок управления гидрораспределителем на подачу давления в подштоковые полости гидроцилиндров механизма подъема 18. В результате осуществляется поворот рампы вокруг поворотной оси 9 в вертикальной плоскости и создается усилие догрузки ведущих колес 5 буксировочного устройства весом, прихо-

дящимся на переднюю стойку ВС, при этом вес распределяется по осям малогабаритного буксировщика равномерно, что обеспечивает необходимое значение силы сцепления ведущих и управляемых колес. Затем оператор при помощи дистанционного пульта производит управление процессом буксировки ВС. В случае возникновения радиопомех управление буксировщиком возможно осуществлять при помощи разъема резервного канала 26, подключив кабель к пульта управления буксировщиком 15.

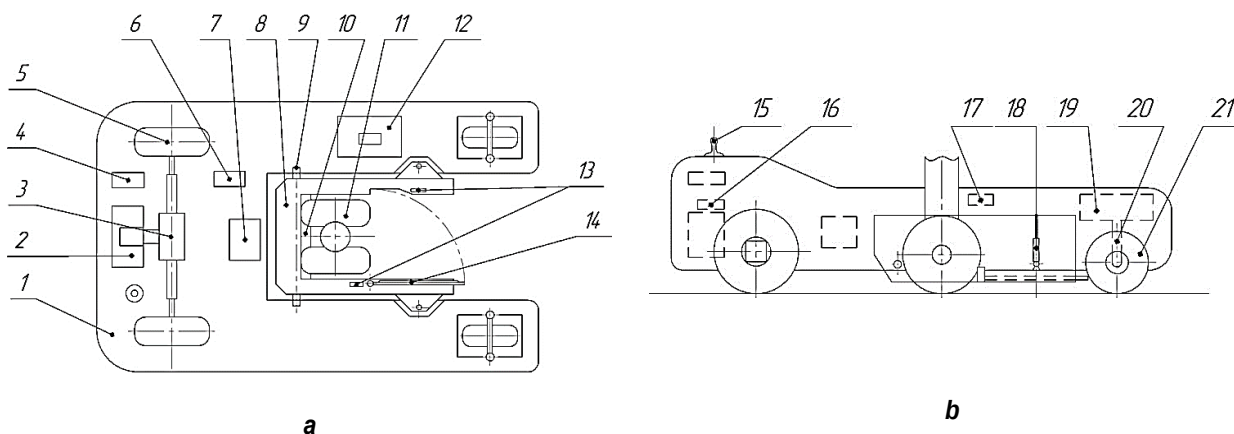


Рис. 1. Схема малогабаритного буксировщика воздушных судов с дистанционным управлением:

a – вид сверху; b – вид сбоку

Fig. 1. Diagram of a small remote control aircraft towing tractor:

a - top view; b - side view

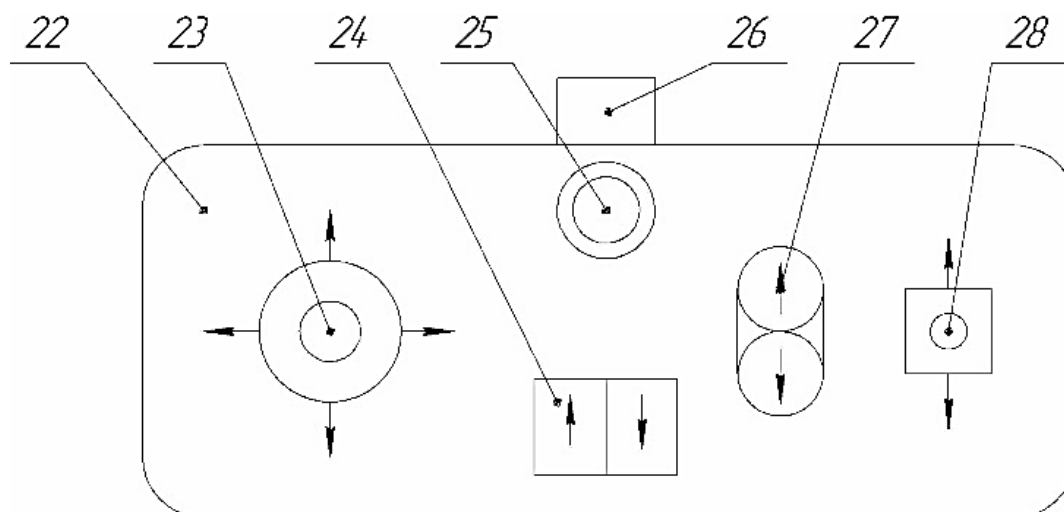


Рис. 2. Пульт дистанционного управления малогабаритным буксировщиком воздушных судов

Fig. 2. Remote control of a small aircraft towing tractor



Пульт управления 22 с размещенными на нем элементами, имеющими определенные положения управляющего воздействия на буксировщик, позволяет формировать команды управления, которые посредством сгенерированных сигналов передаются на приемник 4 буксировщика, где производится расшифровка полученных сигналов и дальнейшая их передача на микроконтроллер управления 5, способный с использованием программного обеспечения обрабатывать полученные сигналы и реализовать управление исполнительными элементами 16, 17, 19 [6].

Для апробации данного способа разработана модель малогабаритного буксировщика воздушных судов с дистанционным управлением (рис. 3).

В настоящее время по методике тягового расчета, представленной ранее в работе [7], проводятся экспериментальные исследования работы буксировщика на тяговом режиме с использованием системы датчиков, позволяющей построить тяговую характеристику разработанного устройства с целью оценки основных тягово-экономических показателей качества. Исследования направлены на определение максимальной силы, подведенной к колес-

ному движителю буксировщика:

$$F_{mo} = F_{fm} + F_{\omega} + F_h + F_{kp} + F_n + F_a,$$

где F_{mo} – сила, подведенная к ведущим колесам; F_{fm} – сила сопротивления качения; F_{ω} – сила сопротивления воздуха; F_h – сила сопротивления подъему; F_{kp} – сила тяги на крюке; F_n – сила сопротивления в подвеске при колебаниях (при движении по абсолютно ровной дороге $F_n = 0$); F_a – сила инерции.

Методика тягового расчета предусматривает построение тяговой характеристики основных показателей качества функционирования малогабаритного буксировщика от развиваемой им силы, подведенной к ведущим колесам, оказывающей существенное влияние на силу тяги T . К основным показателям качества функционирования малогабаритного буксировщика относится действительная скорость движения V_d , тяговая мощность N_T , часовой G_T и удельный эффективный расход топлива g_T :

$$V_d = f(T, \delta); N_T = f(T, \delta); \\ G_T = f(T); g_T = f(G_T, N_T).$$



Рис. 3. Буксировка самолета Як-130
Fig. 3. Yak -130 aircraft towing



С этой целью определяются значения кривой буксования колесного движителя δ , оказывающие влияние на определение тяговых возможностей. Суть методики построения тяговой характеристики малогабаритного буксировщика состоит в необходимости учета влияния особенностей взаимодействия системы «малогабаритный буксировщик – ВС» при загрузке передней стойки воздушного судна на рампу подъема буксировщика. На основании полученных опытных данных возникла необходимость получения более полного изучения процесса взаимодействия колесного движителя с заснеженной опорной поверхностью во всем интервале буксования колесного движителя, так как данная поверхность характеризуется низкими сцепными качествами (рис. 4).

В результате проведенных натурных испытаний получены экспериментальные

тяговые характеристики на поверхности с различными коэффициентами сцепления. Установлено, что догрузка в 5,5 кН, приходящаяся на переднюю стойку, увеличивает сцепной вес малогабаритного буксировщика и позволяет добиться максимальной силы тяги T на следующих опорных поверхностях:

- сухом цементобетонном покрытии – 5 кН;
- мокрым цементобетонном покрытии – 3,6 кН;
- заснеженном покрытии – 1,88 кН;

Достигнутые параметры силы тяги малогабаритного буксировщика позволяют производить буксировку воздушных судов по опорной поверхности, имеющей различные значения коэффициента сцепления, в том числе по заснеженной.

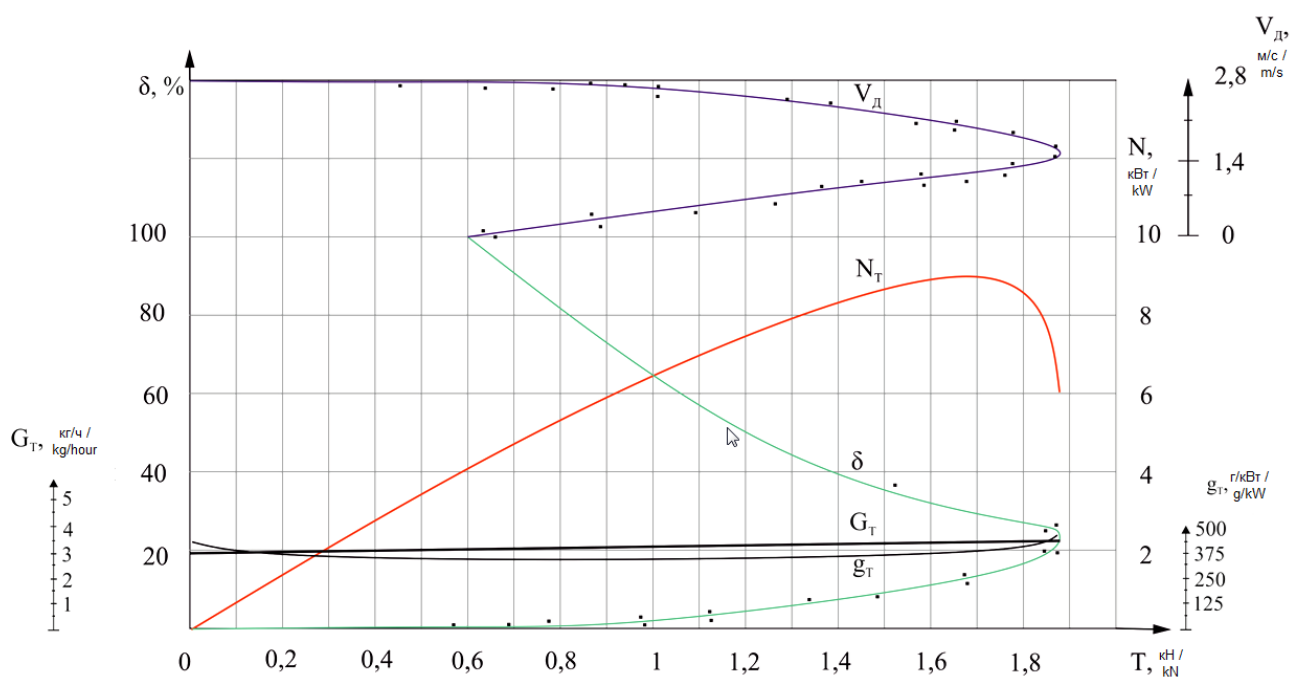


Рис. 4. Экспериментальная тяговая характеристика малогабаритного буксировщика по заснеженному цементобетонному аэродромному покрытию с догрузкой весом 5,5 кН, приходящимся на переднюю стойку:

точки – экспериментальные данные; кривые – аппроксимация

Fig. 4. Experimental traction characteristic of a small-sized towing tractor on a snow-covered cement-concrete aerodrome covering with the additional loading of 5.5 kN of the nose gear: points stand for experimental data; curves – for approximation



Заключение

Использование предложенного устройства позволит начать новый этап развития средств наземного транспортирования воздушных судов. Особо отметим, что применение на современных аэродро-

мах средств транспортирования ВС с использованием элементов дистанционного управления позволит повысить эффективность наземного обеспечения полетов.

Библиографический список

1. Зацепин В.В., Лиховидов Д.В., Дьяков Д.Е., Мачехин Р.А. Проблемы эксплуатации аэродромных буксировщиков и пути их решения // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 1. С. 235.
2. Пат. 2365524, Российская Федерация, МПК В 64 F 1/22. Малогабаритное устройство для буксирования воздушных судов / А.В. Великанов, Ф.С. Германович; заявитель и патентообладатель ГБОУ ВПО «ВВВАИУ (ВИ)» МО РФ. № 2008111597/11; заявл. 25.03.2008, опубл. 27.08.2009. Бюл. № 24.
3. Пат. 2483988, Российская Федерация, МПК В 64 F 1/22. Малогабаритное устройство для буксирования воздушных судов / А.В. Великанов, А.С. Германович, Н.А. Великанова, Р.А. Проскурин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ВАИУ» (г. Воронеж) МО РФ. № 2011144986/11; заявл. 07.11.2011, опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16.
4. Пат. № 2618611, Российская Федерация, МПК В 64 F 1/22. Способ буксировки самолетов с исполь-

- зованием малогабаритного буксировщика с дистанционным управлением / Д.Е. Дьяков, Д.В. Лиховидов, А.В. Великанов [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГКБОУ ВПО «ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) МО РФ. № 2016111467; заявл. 29.03.2016, опубл. 04.05.2017, Бюл. № 13.
5. Дьяков Д.Е. Лиховидов Д.В., Великанов А.В. Модель буксировочной системы авиационного комплекса с дистанционным управлением // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 10-3. С. 466–470.
6. Миль Г. Электронное дистанционное управление моделями; пер. с нем. В.Н. Пальянова. М.: Изд-во ДОСААФ, 1980. 416 с.
7. Дьяков Д.Е., Гусев Ю.В., Лиховидов Д.В., Дубец С.В. Тяговый расчет перспективной буксировочной системы авиационных комплексов // *Вестник ИргТУ*. 2017. Т. 21. № 2. С. 163–169. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-163-169

References

1. Zatsepin V.V., Likhovidov D.V., D'yakov D.E., Machekhin R.A. The problem of aerodrome tow operation and their solution methods. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014, no. 1, p. 235. (In Russian)
2. Velikanov A.V., Germanovich F.S. *Malogabaritnoe ustroystvo dlya buksirovaniya vozdushnykh sudov* [A small-sized device for aircraft towing]. Patent RF, no. 2365524, 2009.
3. Velikanov A.V., Germanovich A.S., Velikanova N.A., Proskurin R.A. *Malogabaritnoe ustroystvo dlya buksirovaniya vozdushnykh sudov* [A small-sized device for aircraft towing]. Patent RF, no. 2483988, 2013.
4. D'yakov D.E., Likhovidov D.V., Velikanov A.V. [et al.]. *Sposob buksirovki samoletov s ispol'zovaniem malogabaritnogo buksirovshchika s distantsionnym*

- upravleniem* [A method of aircraft towing with the use of a small remote control towing machine]. Patent RF, no. 2618611, 2017
5. D'yakov D.E. Likhovidov D.V., Velikanov A.V. Model of towing system of aviation complex with remote control. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2015, no. 10-3, pp. 466–470. (In Russian)
6. Mil' G. *Elektronnoe distantsionnoe upravlenie modelyami* [Electronic remote control of models]. Moscow: DOSAAF Publ., 1980, 416 p.
7. D'yakov D.E., Gusev Yu.V., Likhovidov D.V., Dubets S.V. Traction calculation of a promising aircraft complex towing system. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 2, pp. 163–169. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-163-169

Критерии авторства

Дьяковым Д.Е. самостоятельно получены и оформлены научные результаты, он полностью несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Diakov D.E. independently obtained and formalized the scientific results. He also bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declare that there is no conflict of interests regarding the publication of the article.

Статья поступила 04.12.2017 г.

The article was received 04 December 2017



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ КРУПНОГО ГОРОДА И ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ: КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ, НЕОБХОДИМОСТЬ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

© И.Н. Макаров¹

Финансовый Университет при Правительстве Российской Федерации, Липецкий филиал, Российская Федерация, 398600, г. Липецк, ул. Интернациональная, 12б.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Данная работа посвящена анализу перспектив развития транспортных систем крупных городов и городских агломераций. В работе даются ключевые признаки городской агломерации с точки зрения транспортного обеспечения, выделяются различия между транспортной системой города и агломерации. Целью данной работы является выявление основных критериев эффективности развития транспортных систем крупных городов и агломераций с целью разработки рекомендаций по оптимизации траекторий их управляемой эволюции. **МЕТОДЫ.** В работе использовались такие методы научного анализа, как диалектический, сравнительно-экономический, статистический, системный, системно-функциональный, историко-генетический, экономико-математическое моделирование, теории управления организационно-экономическими системами и метод научной абстракции. Комплексное их применение позволило обеспечить достоверность проведенного исследования. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Опираясь на выводы ряда исследователей, касающиеся эффективности функционирования транспортных систем городов, были синтезированы разные точки зрения, выводы и теоретические положения формирования эффективности городской транспортной системы в модель комплексной эффективности функционирования транспортной системы крупного города. Также в работе рассматриваются и классифицируются факторы, существенно влияющие на эффективность функционирования городской транспортной системы. Автором сформулированы, обоснованы и раскрыты критерии оптимальности развития транспортной системы городской агломерации. **ВЫВОДЫ.** Особенностью агломерации является наличие в ее составе разнородных транспортных сетей – транспортных систем многих, входящих в агломерацию населенных пунктов, которые формировались во многом стохастически. Соответственно в составе городских агломераций есть территории с более высокой степенью концентрации хозяйственной деятельности и территории с более низким уровнем концентрации капитала. Как следствие, критерий капитализации территории должен учитываться в составе критериев разработки и принятия управленческого решения о прокладке или трансформации транспортной магистрали (ветки магистрали) городской агломерации. Следствием данного критерия является необходимость формирования эффективного графа транспортной сети агломерации с точки зрения обеспечения оптимальности всего агломерационного развития.

Ключевые слова: городская транспортная система, агломерация, сеть, дорога, транспорт, территория.

Формат цитирования: Макаров И.Н. Эффективность функционирования и развития транспортной системы крупного города и городской агломерации: критерии оптимизации, необходимость мультимодального взаимодействия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 209–217. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-209-217

OPERATION AND DEVELOPMENT EFFICIENCY OF LARGE CITY AND URBAN AGGLOMERATION TRANSPORT SYSTEM: OPTIMIZATION CRITERIA, NEED FOR MULTIMODAL INTERACTION

I.N. Makarov

Finance University under the Government of the Russian Federation, Lipetsk branch, 12b Internatsionalnaya St., Lipetsk 398600, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. This paper deals with the development prospects of transport systems in large cities and urban agglomerations. The paper defines the key features of urban agglomeration in terms of transportation provision, identifies the differences between the transport system of the city and agglomeration. The purpose of this work is to identify the main efficiency criteria of transport system development in large cities and agglomerations in order to develop the recommendations for optimizing the trajectories of their controlled evolution. **METHODS.** Such methods of scientific analysis as dialectical, comparative and economic, statistical, system, system and functional, historical and genetic are used in

¹Макаров Иван Николаевич, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики, менеджмента и маркетинга, e-mail: excellenzz@mail.ru

Ivan N. Makarov, Candidate of Economy, Associate Professor of the Department of Economics, Management and Marketing, e-mail: excellenzz@mail.ru



the study together with the economic and mathematical modeling, the theory of organizational and economic systems management and the method of scientific abstraction. Their complex application allowed to ensure the reliability of the conducted research. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Based on the conclusions of a number of researchers dealing with the operation efficiency of urban transport systems, we have synthesized different points of view, conclusions and theoretical assumptions on the formation of urban transport system efficiency into the model of the integrated efficiency of transport system operation in a large city. The work also considers and classifies the factors that have a significant influence on the operation efficiency of the urban transport system. The author has formulated, justified and described the optimality criteria of urban agglomeration transport system development. **CONCLUSIONS.** Agglomeration features the presence of diverse transport networks in its composition – they are the transport systems of many communities and settlements included in the agglomeration and stochastically formed in many respects. Therefore, urban agglomerations comprise the areas with a higher degree of economic activity concentration and the areas with a lower level of capital concentration. As a consequence, the criterion of area capitalization must be taken into account as a part of the criteria for the development and managerial decision-making on laying or transformation of a highway (branch of a line) of the urban agglomeration. A consequence of this criterion is the need to form an effective graph of the transport network agglomeration in terms of ensuring the development optimality of the agglomeration as a whole.

Keywords: urban transport system, agglomeration, network, road, transport, territory

For citation: Makarov I.N. Operation and development efficiency of large city and urban agglomeration transport system: optimization criteria, need for multimodal interaction. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 209–217. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-209-217

Введение

В настоящее время среди исследователей проблематики городского развития доминирует точка зрения, что агломерации являются естественным продолжением жизненного цикла развития городов. Автор настоящей статьи также придерживается этого мнения. Соответственно *целью данной работы* является выявление основных критериев эффективности развития транспортных систем крупных городов и агломераций для разработки рекомендаций по оптимизации траекторий их управляемой эволюции.

Рассмотрим разницу между городом и агломерацией для определения того, каким образом переход городов к агломерационной стадии развития должен повлиять на стратегию формирования эффективной городской транспортной системы.

С точки зрения транспортного обеспечения ключевыми признаками городской агломерации являются:

1. Наличие нескольких городских транспортных систем, подвергшихся значимой степени объединения и в предельном случае функционирующих в качестве единого целого.

2. Наличие существенного пространства (площади), на котором проживает и работает население городской агломерации.

3. Существенная протяженность транспортных линий (сетей), связывающих между собой отдельные элементы (части, городские районы, населенные пункты) городской агломерации, как правило, превышающая сложившиеся протяженности линий городских транспортных систем.

4. Наличие существенных пассажиро- и грузопотоков между элементами городской агломерации, плотность которых значительно превышает плотность таковых с населенными пунктами, не входящими в агломерацию.

5. Более высокий уровень надежности транспортного сообщения между элементами (частями, районами, населенными пунктами) городской агломерации для функционирования социально-экономической системы, включая производственную и распределительную подсистемы агломерации как единого целого.

Рассмотрим факторы формирования эффективности эволюционирующих транспортных систем города и городской агломерации. Для этого определим разницу в функционировании данных систем, между критериями их эффективности, а также факторы, влияющие на эффективность функционирования транспортной системы отдельно взятого крупного города и транспортной системы городской агломерации.



Методы исследования и их анализ

На основании выводов ряда исследователей, касающихся эффективности функционирования транспортных систем городов, автором синтезированы разные точки зрения и теоретические положения формирования эффективности городской транспортной системы (ГТС) в описанную ниже модель (рис. 1)^{2,3} [1–8].

Факторы, существенно влияющие на эффективность функционирования ГТС, по критерию принадлежности можно условно подразделить на внутренние и внешние.

В качестве основных внешних факторов необходимо выделить:

1. Растущий уровень автомобилизации населения как объективная устойчивая тенденция, определяемая стремлением к комфорту, повышением качества жизни и экономическими возможностями человека.

2. Развитие сетей внешнего транспорта, что также оказывает существенное влияние на систему городского транспорта и что особенно важно для городских агломераций, где городской транспорт эксплуатируется на пригородных маршрутах и взаимодействует с пригородными железнодорожными перевозками. Это включает развитие трамвайного сообщения, в том числе скоростного трамвая, и альтернативных видов транспорта, например, легкого метро, для прокладки части линий которого возможно использование внутригородских железнодорожных линий и трамвайных путей.

Основными внутренними факторами являются:

1. Совершенствование взаимодействия различных видов транспорта в рамках единой городской транспортной системы.

2. Оптимизация маршрутизации городских пассажирских перевозок – формирование новых маршрутов, сокращение или закрытие маршрутов с низким пассажиропотоком, не имеющих существенной социальной значимости;

3. Внедрение и совершенствование системы взаимодействия «пассажир – маршрут». Суть данной идеи заключается в формировании системы, включающей и выдающей в режиме реального времени (онлайн) информацию о маршрутах общественного транспорта, наполняемости подвижного состава. Фактически это некий аналог систем «яндекс – транспорт» и «2gis», позволяющий пассажиру с помощью смартфона прокладывать оптимальный маршрут передвижения по городу, контролировать свое передвижение и производить оплату проезда.

4. Оптимизация транспортных потоков на внутригородских дорогах и распределение потоков между внутригородскими и объездными дорогами.

Рассмотрим теперь разницу между городской транспортной системой, прежде всего в контексте городских пассажирских перевозок, как наиболее важной составляющей этой системы, и транспортной системой городской агломерации.

²Ковалева Н.А. Пространственно-технологическое развитие городских пассажирских транспортных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Ростов-на-Дону, 2015. 150 с. / Kovaleva N.A. Spatial and technological development of urban passenger transport systems: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.22.01. Rostov-on-Don, 2015. 150 p.

³Пугачев И.Н. Теоретические принципы и методы повышения эффективности функционирования транспортных систем городов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Екатеринбург, 2010. 367 с. / Pugachev I.N. Theoretical principles and methods to improve the efficiency of urban transport systems: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.22.01. Ekaterinburg, 2010. 367 p.

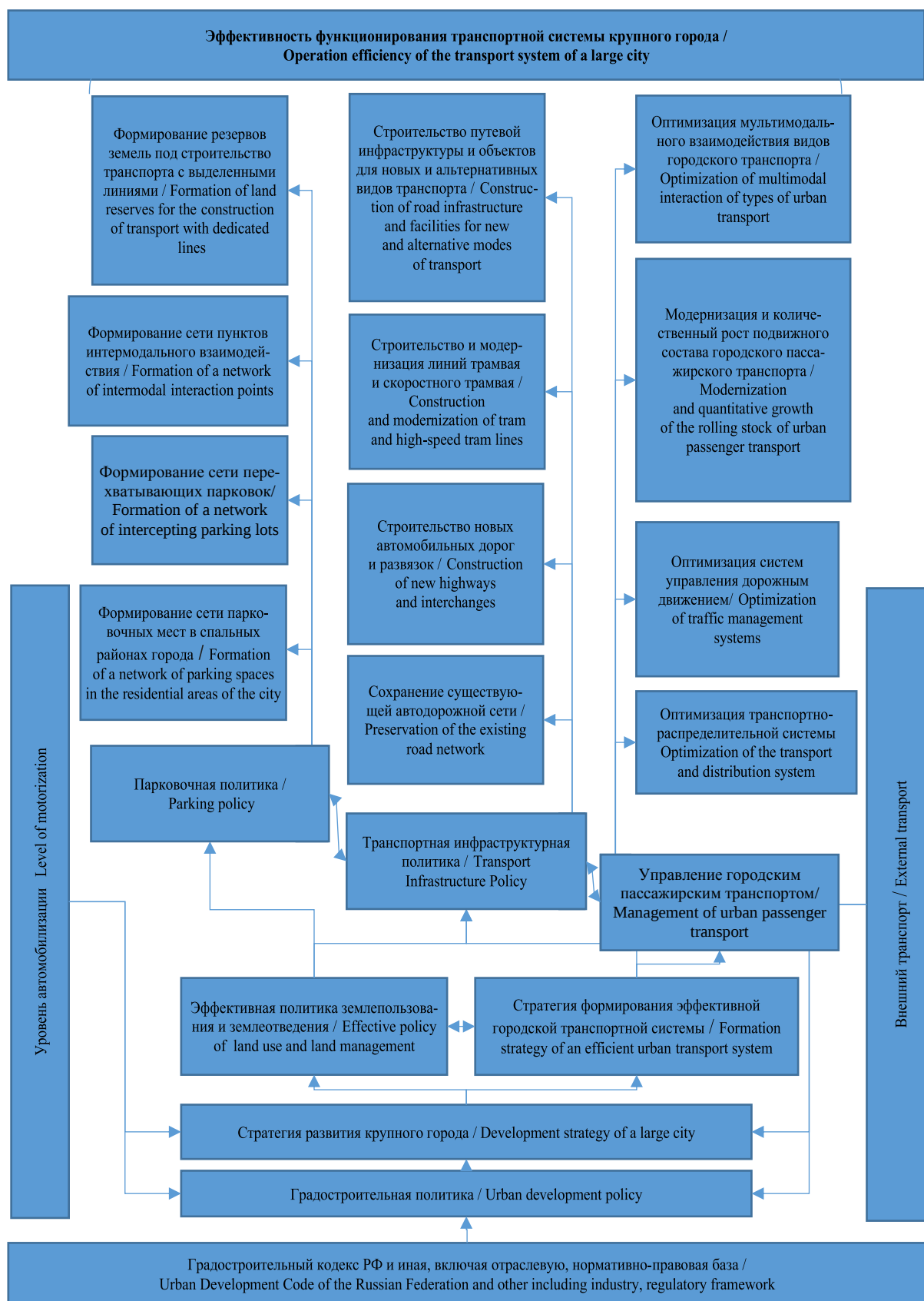


Рис. 1. Модель формирования комплексной эффективности функционирования транспортной системы крупного города

Fig. 1. Formation model of a complex operation efficiency of the transport system of a large city



В соответствии с Постановлением Правительства Москвы⁴ дефиниция «городской пассажирский транспорт» трактуется как «функционирующая на территории города и, в некоторых случаях, за ее пределами устойчивая, развивающаяся в соответствии с социально-экономическими концепциями и планированием жизнеобеспечения города система перевозок пассажиров». Поэтому ее можно охарактеризовать как транспортную систему агломерации. Исходя из определения городской агломерации, когда в качестве таковой в рамках взаимодействия «суперсистема – система» агломерация выступает в качестве суперсистемы, транспортной системой городской агломерации будет выступать система, связывающая населенные пункты, входящие в агломерацию, а также транспортные системы этих населенных пунктов. Данная система должна включать транспортное пространство и транспортную сеть для функционирования пассажирского транспорта (автомобили, трамваи, колесный пассажирский транспорт различных типов, поезда пригородного сообщения, метро и др.) как внутри городской агломерации, так и между населенными пунктами, входящими в городскую агломерацию.

Соответственно, для повышения эффективности функционирования транспортной системы городской агломерации как сложной системы, исходя из ее определения, необходимо:

- повышение эффективности транспортных систем населенных пунктов, входящих в агломерацию;
- повышение эффективности транспортных связей между населенными пунктами, входящими в агломерацию.

Типовая модель транспортной системы городской агломерации

Для того чтобы разработать подходы к формированию критериев эффективности транспортной системы городской агломерации, необходимо выявить функции данной транспортной системы, сопоставить их с функциональной нагрузкой ГТС, сформировать типовую модель транспортной системы городской агломерации.

Очевидно, что в качестве первой функции транспортной системы городской агломерации выступает обеспечение связи элементов агломерации. То есть *первым критерием* эффективности транспортной системы городской агломерации является ее способность пропустить максимальные потоки грузов и пассажиров с учетом реального распределения грузопотока и пассажиропотока по транспортным средствам в периоды наибольшей интенсивности данных потоков без формирования заторов. Значит, пропускная способность основных магистралей транспортной системы городской агломерации, а также непосредственно связанных с ними распределяющих дорог должна быть не меньше максимального потока заявок, связанных с пассажиро- и грузопотоками, а также перемещающими («доставляющими») данные потоки транспортными средствами.

Формально данный критерий можно выразить следующим образом:

$$\begin{cases} \mu_i \geq \lambda_i^{max} \\ \lambda_i^{max} = \max(\lambda_i), \\ \forall i = \overline{1, n} \end{cases}$$

где λ_i – транспортный поток (поток заявок), формируемый на i -м направлении, лежащем на одном из ребер графа транспортной сети агломерации; μ_i – пропускная способность автодороги или иной транспортной артерии на i -м направлении, лежащем на одном из ребер графа

⁴О проекте закона города Москвы «О городском пассажирском транспорте»: постановление от 30.03.1999 г. № 239-ПП / On the Draft Law of the City of Moscow “On Urban Passenger Transport”: Decree of 30 March 1999 no. 239-PP.



транспортной сети агломерации; n – количество направлений на всех ребрах графа транспортной сети агломерации.

Данный критерий можно существенно варьировать за счет использования общественного пассажирского транспорта, обладающего выделенными полосами движения или, в идеальном случае, собственным транспортным пространством. Например, в случае использования трамвая или скоростного трамвая можно увеличивать интенсивность движения трамваев, сокращая интервалы движения в часы пик и увеличивая их в межпиковые периоды.

Применительно к сетям автомобильного транспорта вариации пропускной способности крайне ограничены. Фактически одним из основных вариантов пропускной способности на автомагистрали будет реализация реверсивного движения.

Представим, что интенсивность транспортного потока в каком-либо определенном направлении будет зависеть от времени суток:

$$\lambda = \lambda(t).$$

В этом случае математическим описанием ситуации на ребре графа транспортной сети городской агломерации, фактически представляющим собой участок магистрали, будет выступать следующая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{\Sigma} = \mu_{\text{пр}} + \mu_{\text{обр}} + \mu_{\text{рев}} \\ \mu_{\text{пр}} + \mu_{\text{рев}} \geq \lambda_{\text{пр}}^{\max} \\ \mu_{\text{обр}} + \mu_{\text{рев}} \geq \lambda_{\text{обр}}^{\max} \\ t_{\text{пр}}^{\max} = \{t_i; t_j\} \\ t_{\text{обр}}^{\max} = \{t_{\zeta}; t_{\xi}\} \\ t_{\text{пр}}^{\max} \neq t_{\text{обр}}^{\max} \\ t_{\text{пр}}^{\max} = \operatorname{argmax} \lambda_{\text{пр}}(t) \\ t_{\text{обр}}^{\max} = \operatorname{argmax} \lambda_{\text{обр}}(t) \\ T = t_{\text{пр}}^{\max} + t_{\text{обр}}^{\max} + t_1 + t_2 + t_3 = 24. \end{array} \right.$$

Отобразим временные отрезки на стреле времени. В графическом виде это будет выглядеть следующим образом (рис. 2).



Рис. 2. Отображение временных отрезков загруженности участка пути на суточной стреле времени
Fig. 2. Display of time intervals of traffic congestions on a road section on a daily time arrow

Вышеуказанная система уравнений будет совместной при положительном решении двух условий:

1. Наличие значительных участков магистрали, позволяющих выделить под организацию реверсивного движения достаточное количество полос, чтобы общая пропускная способность участка дороги в часы утреннего и вечернего максимума в каждом направлении позво-



лила пропустить весь транспортный поток без существенных задержек.

2. Полного несовпадения времени утреннего и вечернего максимумов или иначе – с учетом времени, необходимого на освобождение и переключение полос реверсивного движения, включаемого, соответственно в $t_{\text{пр}}^{\text{max}}$ и $t_{\text{обр}}^{\text{max}}$, требуется выполнение следующего условия:

$$t_2 = \zeta - j \geq 0.$$

В качестве *второго критерия* эффективности транспортной системы городской агломерации автором выдвигается критерий пространственной эффективности, включающий ряд аспектов.

1. Оптимальность формирования графа транспортной сети агломерации. Этот аспект важен для функционирования транспортной системы агломерации, поскольку оптимальность графа сети, как правило, влечет за собой оптимальность маршрута транспортного средства, что в свою очередь должно приводить к минимизации времени нахождения в пути, пройденного расстояния, а также связанных с данными параметрами затрат пассажиров и затрат на эксплуатацию транспортного средства. В качестве варианта оптимизации графа транспортной сети можно использовать алгоритм «дерево Штейнера» или алгоритм Крускала (Краскала) с некоторой модификацией. При применении названных алгоритмов необходимо учитывать, что в реальной агломерации пространство не является однородным и пустым. Более того, стоимость пространства будет функцией от стоимости земли в городской агломерации, которая, что наиболее вероятно, будет являться функцией, зависящей от расположения, транспортной доступности и экологической ситуации.

Предположение: более дорогие участки земли в городской агломерации должны иметь лучшее транспортное обеспечение по сравнению с другими участками.

Доказательство. Как правило, более дорогие территории, находящиеся в частной собственности, будут использоваться для видов деятельности, приносящих наибольшую выгоду. Иначе говоря, любой владелец ценного капитала в виде земли, исходя из базовых постулатов экономической теории и рыночной экономики, будет стремиться к максимальной капитализации своего имущества. Учитывая, что плохая транспортная доступность будет негативно влиять на стоимость земли и расположенного на ней имущества, очевидно, что владельцы данных объектов предпримут все меры для улучшения транспортной доступности. В случае если цена объекта изначально обусловлена хорошей транспортной доступностью, в интересах владельца будет принятие мер для сохранения «status quo».

2. Оптимальность использования пространства (территории) городской агломерации. В данном случае речь идет, во-первых, об обеспечении оптимальной транспортной доступности максимального количества территорий городской агломерации, во-вторых, транспортное пространство в городских агломерациях должно занимать (использовать) минимум дорогостоящих земельных ресурсов городской агломерации, а пути сообщения (автомобильные дороги, трамвайные линии) и инфраструктурные элементы транспортной системы должны располагаться на земельных участках агломерации, имеющих наименее возможную цену (при неизменном сохранении принципа технико-экономической целесообразности, включая критерий минимума затрат на функционирование и обслуживание транспортной системы городской агломерации).

Соответственно при формировании оптимального графа транспортной сети агломерации в целом необходимо более рационально использовать территории с низкой плотностью хозяйственной деятельности и низким уровнем капитализации. Прежде всего это будет касаться формирования инфраструктурных объектов и систем межмодального взаимодействия общеагломерационного значения.

В перспективе, очевидно, данные тенденции должны привести к распространению видов транспорта, имеющих выделенные линии движения, обособленные от автомобильных до-



рог, располагающих собственным транспортным пространством и расположенных вне поверхности земли (надземный и подземный транспорт).

3. Оптимальность использования транспортного пространства агломерации предполагает максимизацию использования всех имеющихся пространственно-территориальных ресурсов транспортной системы агломерации с учетом развития оптимальных для данной агломерации видов пассажирского транспорта. В частности, это предполагает возможное формирование линий скоростного трамвая или, например, легкого метро не только в пределах крупного города – центра агломерации, но и, с целью экономии бюджетных средств, между элементами (населенными пунктами) городской агломерации с максимальным использованием возможностей железнодорожного транспорта и иной имеющейся инфраструктуры.

Третий, бюджетно-финансовый критерий эффективности транспортной системы заключается в том, что функционирование транспортной системы городской агломерации должно быть подчинено принципам минимизации бюджетных затрат и максимизации прибыли (минимизации убытков).

Четвертый критерий – критерий экологической эффективности – должен быть направлен на то, чтобы функционирование транспортной системы городской агломерации сопровождалось минимальным ущербом в природной среде (среде обитания жителей агломерации).

В качестве последнего, *пятого критерия*, выдвигается критерий совпадения стратегического развития транспортной системы городской агломерации и самой агломерации. Этот критерий предполагает необходимость формирования единой концепции, в дальнейшем – стратегии развития городской агломерации, синтезирующей стратегии развития населенных пунктов, входящих в агломерацию, и транспортной стратегии агломерации и составляющих элементов, коррелирующей с общей стратегией развития агломерации.

Заключение

Таким образом, установлено, что особенностью агломерации является наличие в ее составе разнородных транспортных сетей – транспортных систем входящих в агломерацию населенных пунктов, которые формировались и развивались под воздействием решений местной власти, действующих факторов, а также во многом стохастически. Соответственно, в составе городских агломераций есть территории с более высокой степенью концентрации хозяйственной деятельности и территории с более низким уровнем концентрации капитала. Как следствие, критерий капитализации территории несомненно должен учитываться в составе критериев разработки и принятия управленческого решения о прокладке или трансформации транспортной магистрали (ветки магистрали) городской агломерации.

Также следствием данного критерия является необходимость формирования эффективного графа транспортной сети агломерации с точки зрения обеспечения оптимальности всего агломерационного развития. Это, в частности (в соответствии с опытом ряда стран) предполагает, что магистрали агломерационного значения выступают как продолжение городских магистралей.

Библиографический список

1. Акофф Р.Л. Планирование в больших экономических системах. М.: Советское радио, 1972. 224 с.
2. Баркалов С.А., Бакунец О.Н., Гуреева И.В., Колпачев В.Н., Руссман И.Б. Оптимизационные модели распределения инвестиций на предприятии по видам деятельности. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2002. 68 с.
3. Ванько В.И., Ермошина О.В., Кувыркин Г.Н. Вариационное исчисление и оптимальное управление. 3-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 488 с.
4. Казанский Н.Н., Варламов В.С., Галабурда В.Г. Экономическая география транспорта. М.: Транспорт, 1991. 280 с.
5. Дунаев О.Н. Проблемы управления транспортом в регионе в условиях перехода к рынку. М.: Изд-во ГАУ, 1991. 219 с.



6. Леонтьев Р.Г. Формирование единой региональной транспортной системы. М.: Наука, 1987. 152 с.
7. Лившиц В.Н. Системный анализ экономических процессов на транспорте. М.: Транспорт, 1986. 239 с.
8. Шафиркин Б.И. Единая транспортная сеть и взаимодействие различных видов транспорта. М.: Высш. шк., 1977. 240 с.

References

1. Akoff R.L. *Planirovanie v bol'shikh jekonomicheskikh sistemah* [Planning in large economic systems]. Moscow: Soviet radio Publ., 1972, 224 p. (In Russian)
2. Barkalov S.A., Bakunec O.N., Gureeva I.V., Kolpachev V.N., Russman I.B. *Optimizacionnye modeli raspredelenija investicij na predpriyatii po vidam dejatel'nosti* [Optimization models of investment distribution by activity types at an enterprise]. Moscow: IPU RAN Publ., 2002, 68 p. (In Russian)
3. Van'ko V.I., Ermoshina O.V., Kuvyrkin G.N. *Variacionnoe ischislenie i optimal'noe upravlenie* [Variational calculation and optimal control]. Moscow: Moscow State Technical University N.E. Bauman Publ., 2006, 488 p. (In Russian)
4. Kazanskij N.N., Varlamov V.S., Galaburda V.G. *Jekonomicheskaja geografija transporta* [Economic geography of transport]. Moscow: Transport Publ., 1991, 280 p. (In Russian)
5. Dunaev O.N. *Problemy upravlenija transportom v regione v uslovijah perehoda k rynku* [Problems of transport management in the region in transition conditions to the market]. Moscow: State Agrarian University Publ., 1991, 219 p. (In Russian)
6. Leont'ev R.G. *Formirovanie edinoj regional'noj transportnoj sistemy* [Formation of a single regional transport system]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 152 p. (In Russian)
7. Livshic V.N. *Sistemnyj analiz jekonomicheskikh processov na transporte* [System analysis of economic processes in transport]. Moscow: Transport Publ., 1986, 239 p. (In Russian)
8. Shafirkin B.I. *Edinaja transportnaja set' i vzaimodejstvie razlichnyh vidov transporta* [Unified transport network and interaction of various modes of transport]. Moscow: High school Publ., 1977, 240 p. (In Russian)

Критерии авторства

Макаров И.Н. полностью подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Makarov I.N. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 26.11.2017 г.
The article was received 26 November 2017



МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПАРКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

© А.И. Фадеев¹, Е.В. Фомин²

Сибирский федеральный университет,

Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В данной работе предложена методика определения оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта, при которой достигаются максимально возможные параметры качества транспортного обслуживания с учетом ограничений экономической эффективности функционирования транспортных организаций. **МЕТОДЫ.** Формирование оптимальной структуры парка сводится к задаче определения для каждого маршрута вместимости подвижного состава и интенсивности движения таким образом, чтобы на сети маршрутов достигался минимальный коэффициент динамического использования вместимости. При этом учитывается взаимное влияние маршрутов и выполняются накладываемые ограничения экономической эффективности, которые выражаются через количество перевезенных пассажиров на один километр пробега.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Предложенная в статье математическая модель реализована в виде алгоритма направленного перебора вариантов программы перевозок пассажиров на маршрутной сети. Работоспособность предложенного алгоритма проиллюстрирована на абстрактной сети двух взаимодействующих маршрутов. Применение предложенной методики на практике позволит определить программу перевозок на маршрутной сети, при которой обеспечивается максимально возможное качество транспортного обслуживания при действующих тарифах и объемах бюджетного субсидирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования. **ВЫВОДЫ.** В данной статье представлена математическая модель, позволяющая определить для каждого маршрута городского пассажирского транспорта интенсивность движения и вместимость транспортных средств таким образом, чтобы на сети взаимодействующих между собой маршрутов обеспечивались максимально возможные параметры качества транспортного обслуживания при выполнении ограничений экономической эффективности транспортных организаций. Работоспособность алгоритма решения задачи доказана на абстрактной сети двух взаимодействующих маршрутов. Для оценки качества транспортного обслуживания задействован коэффициент использования вместимости подвижного состава – один из основных показателей, определяющих комфортность поездки. Оценка экономической эффективности маршрутов осуществляется посредством количества пассажиров, приходящихся на один километр пробега.

Ключевые слова: наполнение подвижного состава, структура парка подвижного состава, коэффициент использования вместимости, программа перевозок пассажиров.

Формат цитирования: Фадеев А.И., Фомин Е.В. Методика решения задачи определения оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 218–227. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-218-227

PROBLEM-SOLVING METHODS FOR DETERMINING OPTIMAL STRUCTURE OF MUNICIPAL PASSENGER TRANSPORT FLEET

A.I. Fadeev, E.V. Fomin

Siberian Federal University,

26 Kirensky St., Krasnoyarsk 660074, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. This paper proposes a procedure for determining an optimal structure of the urban passenger transport rolling stock that will enable to achieve the highest possible quality parameters of transport service considering the restrictions of economic efficiency of transport organization operation. **METHODS.** Formation of the optimal structure of the rolling stock is reduced to the problem of determining the rolling stock capacity and traffic intensity for each route in such manner as to achieve the minimum coefficient of dynamic use of capacity in the route network. This also takes into account the mutual influence of routes and implements imposed restrictions of economic efficiency represented in the

¹Фадеев Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта, e-mail: fai@ak1967.ru

Aleksandr I. Fadeev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Transport, e-mail: fai@ak1967.ru

²Фомин Евгений Валериевич, старший преподаватель кафедры транспорта, e-mail: 2325337@mail.ru

Evgeny V. Fomin, Senior Lecturer of the Department of Transport, e-mail: 2325337@mail.ru



number of transported passengers per one kilometer. **RESULTS.** The mathematical model introduced in the article is implemented in the form of the algorithm of the directed search for the variants of the program of passenger transportation within the route network. The efficiency of the proposed algorithm is illustrated on the example of an abstract network of two interacting routes. Being applied in practice, the proposed procedure will determine a transportation program in the route network, which will ensure the best quality of transport service for the existing tariffs and volumes of budget subsidizing of the system of municipal passenger transport. **CONCLUSIONS.** This article presents a mathematical model determining traffic intensity and rolling stock capacity for each route of urban passenger transport in order to ensure the best possible quality parameters of transport service in the network of interacting routes when implementing the restrictions on the economic cost-effectiveness of transport organizations. The efficiency of the problem-solving algorithm is proved on an abstract network of two interacting routes. The quality of transport services is assessed using a coefficient of rolling stock capacity that is one of the main indicators that determines the trip comfort. The economic cost-efficiency of routes is estimated on the basis of the number of passengers per one kilometer of travel.

Keywords: occupancy rate of the rolling stock, structure of the rolling stock, coefficient of capacity use, program of passenger transportation

For citation: Fadeev A.I., Fomin E.V. Problem-solving methods for determining optimal structure of municipal passenger transport fleet. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 218–227. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-218-227

Введение

В статье на основании анализа экономических показателей, полученных из разных транспортных организаций, описана зависимость между себестоимостью перевозок и вместимостью автобусов. Очевидно, что автобусы большой вместимости имеют более высокую себестоимость одного километра пробега по сравнению с автобусами малой вместимости. Однако повышение себестоимости не пропорционально увеличению вместимости. При одинаковой степени использования вместимости себестоимость перевозки одного пассажира автобусами большой вместимости ниже по

сравнению с автобусами среднего и малого классов. Можно предположить, что данная закономерность выполняется и для других видов городского пассажирского транспорта общего пользования, осуществляющего перевозки по регулярным маршрутам. Таким образом, для каждого класса транспортного средства можно определить минимальное количество перевезенных пассажиров, приходящихся на один километр пробега по маршруту, при котором заданный пассажирский тариф обеспечивает экономическую эффективность транспортных организаций [1–7].

Определение оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта

В статье рассматривается одна из наиболее актуальных задач, при решении которой должен быть соблюден баланс параметров качества транспортного обслуживания населения и экономической эффективности транспортных организаций.

Задача может быть сформулирована следующим образом.

1. Перевозки пассажиров осуществляются по маршрутной сети $G(I, U)$, состоящей из узлов (множество I) и ребер (множество U). Множество узлов сети I описывает остановки общественного транспорта,

множество U – это перегоны между остановками.

2. Транспортный спрос описывается посредством матрицы корреспонденций $[x_{ij}^t]$.

3. На сети функционирует множество маршрутов. Маршрут $G_k(I_k, U_k)$ является подмножеством G . Как правило, на сети имеются конкурирующие маршруты, т.е. некоторые пассажирские корреспонденции могут быть реализованы через несколько маршрутов.



Пассажирские корреспонденции, которые могут быть обслужены k -м маршрутом, можно определить как подмножество матрицы корреспонденций, сформированное на основании условий $i \in I_k$ и $j \in I_k$: начальный и конечный пункты корреспонденций входят в множество пунктов, через которые проходит k -й маршрут. Определение возможности обслуживания корреспонденции x_{ij} можно осуществить посредством матрицы соответствия остановочных пунктов маршрутам $[c_{ki}]$. Элементы данной матрицы принимают значения 0 или единицы, в зависимости от вхождения i -го остановочного пункта в k -й маршрут.

Количество пассажиров, перевезенных по k -му маршруту, будем рассчитывать по формуле

$$Q_k = \sum_i \sum_j x_{ij} p_{ij}^k, \quad (1)$$

где p_{ij}^k – вероятность обслуживания k -м маршрутом ij -й корреспонденции, при этом $\sum_k p_{ij}^k = 1$.

Для расчета транспортной работы можно использовать следующее выражение:

$$P_k = \sum_i \sum_j x_{ij} p_{ij}^k l_{ij}^k, \quad (2)$$

где l_{ij}^k – длина ij -й пассажирской корреспонденции при реализации по k -му маршруту, км.

На p_{ij}^k оказывает влияние соотношение интервалов движения транспортных средств разных маршрутов через i -й остановочный пункт, время поездки при выборе конкретного маршрута, предпочтения пассажиров, обусловленных параметрами комфортабельности перевозки и другие факторы. В данном случае будем считать все маршруты равнозначными, т.е. пассажир садится в первый подходящий для него автобус. Таким образом, в данном случае p_{ij}^k можно определить как

$$p_{ij}^k = \frac{a_k c_{ki} c_{kj}}{\sum_n a_n c_{ni} c_{nj}}, \quad (3)$$

где a_k, a_n – интенсивность движения по k и n маршруту соответственно, ед./час.

4. Транспортные единицы сгруппированы по вместимости в классы (например, малого, среднего и большого классов). Для каждого класса известна номинальная вместимость транспортного средства Q . Каждый маршрут обслуживается подвижным составом одинаковой вместимости. Количество транспортных средств каждой вместимости, используемых для обслуживания маршрутной сети, будем называть структурой парка подвижного состава.

Экономическую эффективность перевозок будем учитывать посредством числа перевезенных пассажиров, приходящихся на один километр пробега транспортного средства по маршруту. Выбор данного показателя обусловлен тем, что в настоящее время в России на городских перевозках, как правило, применяется пассажирский тариф за поездку, себестоимость перевозок можно рассчитать на один километр пробега по маршруту. Таким образом:

$$Q_{kmi} = \frac{S_{kmi}}{T_p} (1 + k_p / 100), \quad (4)$$

где Q_{kmi} – число перевезенных пассажиров, приходящихся на один километр пробега транспортного средства i -го класса по маршруту, пасс./км; S_{kmi} – себестоимость пробега транспортного средства i -го класса по маршруту, руб./км; T_p – пассажирский тариф, руб.; k_p – рентабельность деятельности транспортной организации, %.

Рассмотрим соотношение экономических показателей применения транспортных средств разных классов на примере автобусов. Анализ экономических показателей, полученных из разных транспортных организаций, позволил получить закономерности, приведенные на рис. 1. На данном рисунке параметры автобусов большой вместимости приняты за 1. При снижении



вместимости автобуса уменьшается себестоимость одного километра пробега по маршруту, однако уменьшение себестоимости не пропорционально снижению вместимости. В результате со снижением вместимости транспортного средства возрастает себестоимость одного место-километра, то есть при одинаковой степени использования вместимости перевозки автобусами большой вместимости имеют меньшую себестоимость перевозки одного пассажира по сравнению с автобусами среднего или малого классов.

Таким образом, на основании изложенного с использованием соотношения (4) можно определить для каждого класса транспортного средства минимальное число перевезенных пассажиров, приходящихся на один километр пробега по маршруту.

Одним из основных показателей качества транспортного обслуживания является коэффициент использования вместимости подвижного состава. При организации перевозок показатели использования вместимости транспортных средств ограничивают таким образом, чтобы на наиболее напряженных участках маршрутов наполнение подвижного состава не превы-

шало величины, определенной производителем.

Интегральную оценку программы перевозок по параметру использования вместимости осуществляют посредством коэффициента динамического использования вместимости транспортного средства. Среднечасовой коэффициент динамического использования вместимости для k -го маршрута можно рассчитать следующим образом:

$$\gamma_{dk} = \frac{P_{hk}}{P'_{hk}} = \frac{P_{hk}}{a_k t_{ok} v_{ek} q_k},$$

где P_{hk} – среднечасовая транспортная работа по k -му маршруту, пасс.-км/ч; P'_{hk} – номинальная часовая транспортная работа по k -му маршруту (транспортная работа при полном использовании вместимости подвижного состава), пасс.-км/ч; t_{ok} – время оборота по k -му маршруту, ч; a_k – интенсивность движения по k -му маршруту, ед./час; v_{ek} – эксплуатационная скорость движения по i -му маршруту, км/ч.

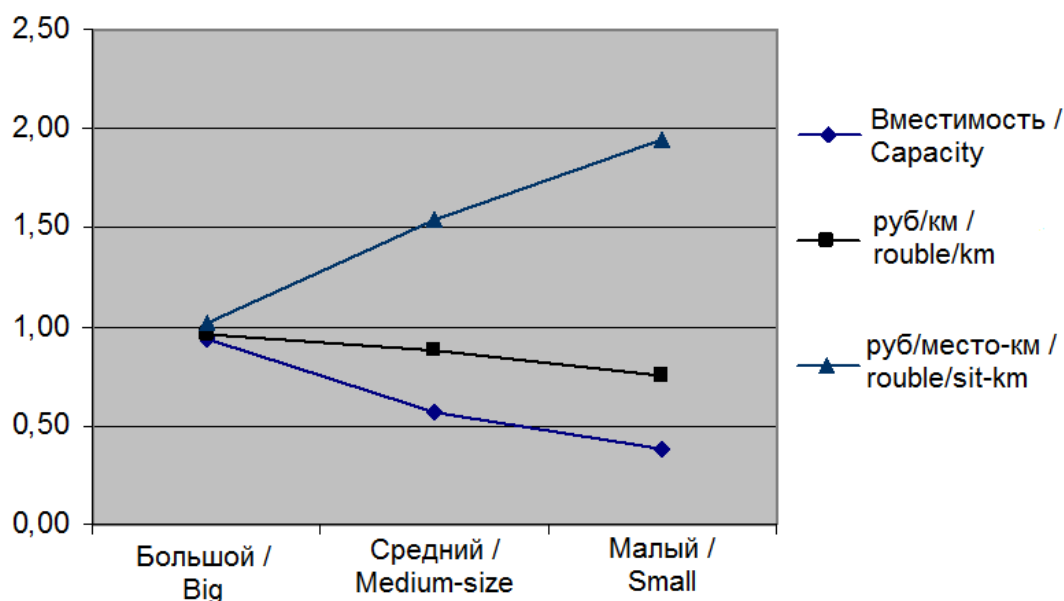


Рис. 1. Соотношение себестоимости перевозок пассажиров автобусами разных классов
Fig. 1. Ratio of the cost of passenger transportation by the buses of different classes



Среднечасовая транспортная работа определена как

$$P_{hk} = P_k / t .$$

В данном выражении t – период времени, за который по формуле (2) рассчитывается транспортная работа.

Интервалы движения транспортных средств имеют ограничения, обусловленные параметрами качества обслуживания (максимальный интервал) и ограничениями пропускной способности инфраструктуры маршрутной сети (минимальный интервал). В данном случае ограничения интервалов будем учитывать через ограничения интенсивности движения транспортных средств по маршрутам ($a_{\max}$, $a_{\min}$).

5. В качестве целевого критерия в данной задаче будем рассматривать минимальный коэффициент использования вместимости подвижного состава в среднем по сети.

Ограничениями задачи являются:

- интервал движения по маршруту;
- число пассажиров, приходящихся на один километр пробега транспортных средств по маршруту.

Очевидно, что наполнение подвижного состава снижается при увеличении частоты движения транспортных средств по маршрутам и вместимости применяемого подвижного состава. Повышение частоты движения транспортных средств обуславливает снижение числа пассажиров, приходящихся на один километр пробега по маршрутам.

Условия рассматриваемой задачи

Требуется определить для каждого маршрута интенсивность движения и класс вместимости транспортных средств таким образом, чтобы на сети маршрутов достигался минимальный коэффициент динамического использования вместимости:

$$\bar{\gamma}_d = \frac{\sum_k P_{hk}}{\sum_k P_{hk}} \Rightarrow \min ,$$

при следующих ограничениях:

$$a_{\min} \leq a_k \leq a_{\max} ;$$

$$Q_{kmk} \geq Q_{\text{км мин}} ,$$

где $Q_{\text{кмк}}$ – минимальное число пассажиров на один километр пробега по маршруту транспорта k -го класса, использующегося на i -м маршруте.

Варьируемыми параметрами в рассматриваемой задаче являются номинальная вместимость подвижного состава и интенсивность (частота) движения по маршруту. Вместимость подвижного состава изменяется дискретно в зависимости от класса транспортного средства.

Зависимость целевой функции от названных параметров нелинейная (рис. 2). Кроме этого при решении задачи следует учитывать взаимное влияние конкурирующих маршрутов.

Алгоритм решения задачи

Алгоритм решения задачи основан на принципе направленного перебора вариантов. Он состоит из двух этапов.

1. Подготовительный этап. Интенсивность движения по всем маршрутам устанавливается минимальной $a_k = a_{\min}$: начальная программа перевозок формируется при максимально возможном интерва-

ле движения. С использованием зависимостей (1)–(3) определяем количество перевезенных пассажиров по всем маршрутам, а также среднечасовой пробег транспортных средств. С учетом ограничений по количеству пассажиров, приходящихся на один км пробега по маршруту, для каждого маршрута определяем класс подвижного



состава, устанавливая максимально возможную вместимость транспортного средства.

На практике возможны маршруты, для которых ограничение по минимальному количеству пассажиров на один километр пробега невыполнимо. Это маршруты с низкой интенсивностью пассажирских потоков. Для таких маршрутов возможны следующие варианты решения: исключить из маршрутной схемы или перевести их в ряд субсидируемых.

2. Расчет оптимальной программы перевозок.

Выбираем маршрут с наибольшим коэффициентом использования вместимости. Обозначим его k -м маршрутом.

Увеличиваем интенсивность движения k -му маршруту на шаг Δa . Осуществляем расчет программы перевозок.

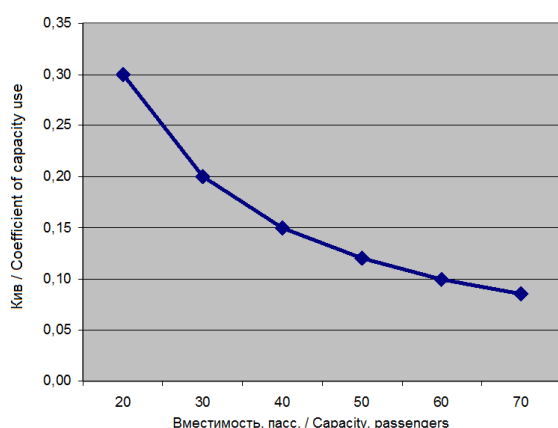
Проверяем выполнение ограничений по числу пассажиров, приходящихся на

один километр пробега по маршрутам. Если имеются маршруты (кроме субсидируемых), для которых это ограничение не выполняется, для каждого из таких маршрутов проверяется возможность устранения этой проблемы путем изменения класса подвижного состава (использование транспортных средств меньшей вместимости).

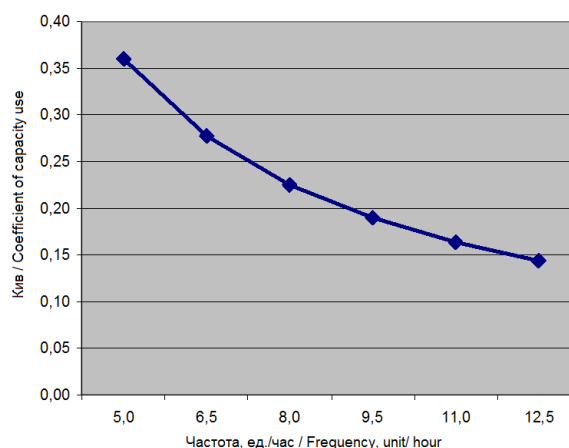
Полученная программа перевозок считается допустимой, если по всем маршрутам (кроме субсидируемых) выполняется ограничение по числу пассажиров, приходящихся на один километр пробега используемого класса транспортного средства.

Если для всех маршрутов сети увеличение интенсивности движения невозможно, расчет завершен.

Из всех рассмотренных вариантов выбирается программа перевозок с наименьшим значением коэффициента динамического использования вместимости подвижного состава.



a



b

Рис. 2. Зависимость коэффициента динамического использования вместимости от номинальной вместимости подвижного состава и интенсивности движения по маршруту:

a – вместимость транспортного средства; b – интенсивность движения по маршруту

Fig. 2. Dependence of the coefficient of dynamic capacity use on the nominal capacity of the rolling stock and traffic intensity on the route: a – vehicle capacity; b – traffic intensity on the route

Пример расчета оптимальной структуры парка

В качестве примера рассмотрим абстрактную маршрутную сеть, состоящую из четырех вершин (рис. 3).

Предположим, что на рассматриваемой сети организованы следующие два

маршрута: маршрут № 1 включает пункты 1, 2, 3; маршрут № 2 – пункты 1, 2 и 4. Матрица пассажирских корреспонденций по данной сети приведена в табл. 1.

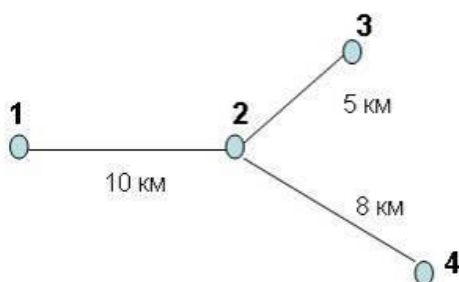


Рис. 3. Схема абстрактной маршрутной сети
Fig. 3. Diagram of an abstract route network

Таблица 1

Матрица пассажирских корреспонденций, пасс./ч

Table 1

Passenger trip distribution matrix, passenger/hour

Пункт отправления / Departure point	Пункт прибытия / Destination				Итого / Total
	1	2	3	4	
1	0	200	100	200	500
2	200	0	50	100	350
3	100	50	0	0	150
4	200	100	0	0	300
Итого / Total	500	250	150	300	1300

Заданы следующие ограничения задачи:

– интервал движения находится в пределах от 2 до 10 мин, т.е. интенсивность движения по маршруту $2 \leq a_i \leq 10$;

– параметры классов подвижного состава даны в табл. 2.

В исходном варианте программы перевозок оба рассматриваемых маршрута обслуживаются автобусами большой вместимости с интервалом движения 10 мин (интенсивность 6 ед./ч).

В рассматриваемой задаче оба маршрута равнозначны для пассажира по

техническим параметрам транспортных средств, тарифам и качеству обслуживания. Таким образом, будем считать, что пассажир, находящийся на остановке, выбирает первое прибывающее транспортное средство, маршрут которого проходит через пункт назначения пассажира. Следовательно, количество перевезенных пассажиров определенного маршрута прямо пропорционально количеству выполненных рейсов или частоте движения автобусов по маршруту. Результаты решения задачи приведены в табл. 3.

Таблица 2

Классы подвижного состава

Table 2

Rolling stock classes

Класс / Class	Вместимость / Capacity	Минимальное значение пасс./км / Minimal value passenger/km
Большой / Big	100	3,0
Средний / Medium-size	75	2,0



Таблица 3

Результаты расчета по модельной сети

Table 3

Calculation results by model network

Вариант / Variant	Варьируемый параметр / Varied parameter	Интенсивность, ед./ч / Frequency, unit/hour	Вместимость, пасс. / Capacity, passengers	Пассажиры в ч / Passengers per hour	Пасс.-км / Passengers-km	Место-км / Sit-km	Кив* / CUC	Пробег, км/ч / Travel, km/hour	Пасс./км / Passengers-km	Кив* итого / Total CUC
Маршрут 1 / Route 1										
1	–	6	100	500	5500	18000	0,31	180	2,8	–
2	Класс автобуса / Bus class	6	75	500	5500	13500	0,41	180	2,8	–
3	–	6	75	471	5214	13500	0,38	180	2,6	–
4	–	6	75	471	5214	13500	0,38	180	2,6	–
5	–	6	75	450	5000	13500	0,37	180	2,5	–
6	Частота / Frequency	7	75	465	5147	15750	0,32	210	2,2	–
7	–	7	75	456	5056	15750	0,32	210	2,2	–
8	Частота / Frequency	8	75	468	5184	18000	0,29	240	2,0	–
9	Класс автобуса / Bus class	8	50	468	5184	12000	0,43	240	2,0	–
10	Частота / Frequency	10	50	490	5405	15000	0,36	300	1,6	–
11	Частота / Frequency	11	50	500	5500	16500	0,33	330	1,5	–
12	Частота / Frequency	12	50	509	5587	18000	0,31	360	1,4	–
Маршрут 2 / Route 2										
1	–	6	100	800	10800	21600	0,50	216	3,7	0,41
2	–	6	100	800	10800	21600	0,50	216	3,7	0,46
3	Частота / Frequency	8	100	829	11086	28800	0,38	288	2,8	0,38
4	Класс автобуса / Bus class	8	75	829	11086	21600	0,51	288	2,8	0,46
5	Частота / Frequency	10	75	850	11300	2700	0,42	360	2,4	0,40
6	–	10	75	835	11153	27000	0,41	360	2,3	0,38
7	Частота / Frequency	11	75	844	11244	29700	0,37	396	2,1	0,35
8	–	11	75	832	1116	29700	0,37	396	2,1	0,34
9	–	11	75	832	1116	29700	0,37	396	2,1	0,39
10	–	11	75	810	10895	29700	0,37	396	2,0	0,36
11	–	11	75	800	10800	29700	0,36	396	2,0	0,35
12	–	11	75	791	10713	29700	0,36	396	2,0	0,34

*Кив – коэффициент динамического использования вместимости / Coefficient of dynamic use of capacity (CUC).

Рассмотрим табл. 3. В данной таблице вариант 1 (подготовительный этап алгоритма) – это программа перевозок при максимальном интервале, равном 10 мин, и подвижном составе большой вместимости. В варианте 2 снижаем вместимость транспортных средств на маршруте 1, поскольку для него не выполняется ограничение по

числу пассажиров, приходящихся на один километр пробега: по расчету – 2,8, минимальное значение – 3,0.

В варианте 3 увеличивается интенсивность движения по маршруту 2. В результате возникла необходимость уменьшить вместимость подвижного состава для данного маршрута, так как не выполняется



ограничение по количеству пассажиров на километр пробега.

Таким образом, сформировано 12 вариантов расчета. На последнем 12-м варианте расчет завершен, поскольку достигнуто ограничение по вместимости и числу пассажиров на километр пробега по маршруту 1. Процесс расчета проиллюстрирован

на рис. 4, из которого видно, что в данном случае существует два равнозначных варианта по значению коэффициента динамического использования вместимости – это варианты 7 и 11 (варианты 8 и 12 не рассматриваются, так как не выполняется ограничение по числу пассажиров на один километр пробега по маршруту).

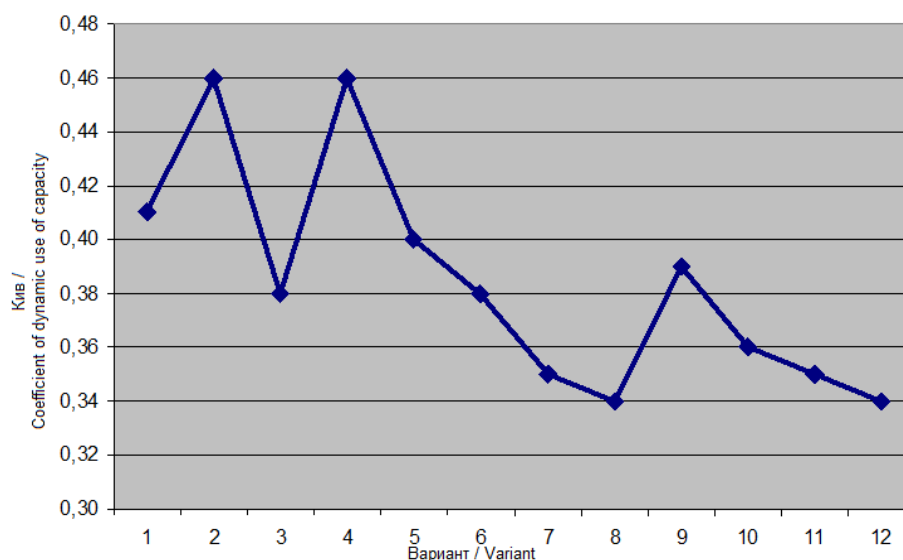


Рис. 4. Зависимость коэффициента динамического использования вместимости от варианта программы перевозок

Fig. 4. Dependence of the coefficient of dynamic use of capacity on the transportation program variant

Заключение

Представленная математическая модель позволяет определить:

- оптимальную структуру парка подвижного состава;
- параметры качества транспортного обслуживания при существующем пассажирском тарифе;

– величину пассажирского тарифа (и размера бюджетного субсидирования) при заданных параметрах качества транспортного обслуживания населения.

Библиографический список

1. Бонсал П.У., Чемперноун А.Ф., Мейсон А.К., Уилсон А.Г. Моделирование пассажиропотоков в транспортной системе; пер. с англ. М.: Транспорт, 1982. 207 с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров; пер. с англ. М.: Наука, 1970. 720 с.
3. Фадеев А.И., Фомин Е.В.. Задача определения оптимальной структуры парка подвижного состава

- городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник ИргТУ. 2012. № 7 (66). С. 130–134.
4. Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок. М.: Высш. шк., 1980. 535 с.
5. Спирин И.В. Перевозки пассажиров городским транспортом. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 413 с.



6. Артынов А.П., Скалецкий В.В. Автоматизация процессов планирования и управления транспортными системами. М.: Наука, 1981. 280 с.

7. Фадеев А.И., Ковалев В.А., Фомин Е.В. Нормирование параметров системы пассажирского транспорта общего пользования // Вестник ИргТУ. 2014. № 12 (95). С. 179–183.

References

1. Bonsall P.W. Modeling passenger flows in the transport system, 1982, 207 p. (Russ. ed.: *Modelirovanie passazhiropotokov v transportnoj sisteme*. Moscow, Transport Publ., 1982, 207 p.)
2. Korn G., Korn T. Handbook on mathematics for researchers and engineers. The translation from English, 1970. 720 p. (Russ. ed.: *Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov*. Moscow, Nauka Publ., 1970, 720 p.)
3. A.I. Fadeev, E.V. Fomin. Problem to determine optimal structure of urban public passenger transport fleet. *Vestnik of Irkutsk state technical University* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2012. no. 7(66), pp. 130–134. (In Russian)
4. Efremov I.S., Kobozev V.M., Yudin V.A., *Teoriya gorodskih passazhirskih perevozok* [Theory of urban pas-

- senger transportation]. Moscow: Higher School Publ., 1980. (In Russian)
5. Spirin I.V. *Perevozki passazhirov gorodskim transportom* [Transportation of passengers by urban public transport]. Moscow: Publishing and book selling center "Akademkniga", 2004, 413 p. (In Russian)
6. Artynov A.P., Skalecki V. *Avtomatizatsiya protsessov planirovaniya i upravleniya transportnymi sistemami*. [Automation of transport system planning and management processes]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 280 p. (In Russian)
7. Fadeev A.I., Kovalev V.A., Fomin E.V. Public transport system parameter normalization. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 12 (95), p. 179–183. (In Russian)

Критерии авторства

Фадеев А.И., Фомин Е.В. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Fadeev A.I., Fomin E.V. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 01.06.2018 г.

The article was received 01 June 2018



КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЦИСТЕРН ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА МАГНИТОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© Г.И. Федюкович¹

Иркутский государственный университет путей сообщения,

Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, Чернышевского, 15.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Статья посвящена результатам работ по механизации и автоматизации технологических процессов магнитного контроля, проведенных с целью уменьшения влияния человеческого фактора на достоверность дефектоскопии и повышения производительности труда при выявлении опасных дефектов. **МЕТОДЫ.** Для повышения эффективности применения неразрушающего контроля качества деталей подвижного состава, имеющих сложную форму контролируемой поверхности, предложен еще один магнитный метод – магнитографический, в котором в качестве чувствительного элемента для регистрации дефектов используется магнитная лента.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Выполнен ряд разработок в части средств контроля и технологической документации, которые позволяют облегчить процедуру намагничивания и магнитной записи при проведении магнитографической дефектоскопии емкостной аппаратуры, например железнодорожных цистерн. Новизна технических решений подтверждена авторскими свидетельствами и патентом. **ВЫВОДЫ.** Применение метода МГК с импульсным намагничиванием по разработанной методике существенно упрощает технологические операции и повышает выявляемость таких опасных дефектов как трещины на стадии зарождения.

Ключевые слова: магнитный контроль, магнитные поля рассеяния, магнитографический метод, магнитная лента, дефектограммы.

Формат цитирования: Федюкович Г.И. Контроль качества сварных соединений цистерн подвижного состава железнодорожного транспорта магнитографическим методом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 228–238. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-228-238

QUALITY CONTROL OF RAILROAD TANK CAR WELDED JOINTS BY MAGNETOGRAPHIC METHOD

G.I. Fedyukovich

Irkutsk State Transport University,

15 Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The article deals with the results of works on mechanization and automation of the technological processes of magnetic monitoring conducted in order to reduce the influence of a human factor on the reliability of non-destructive flaw detection and increase the labour productivity of critical flaw identification. **METHODS.** A magnetographic method using a magnetic tape as a sensitive element for flaw recording is proposed in order to improve the application efficiency of the non-destructive quality control of rolling stock parts with the complex shape of the monitored surface. **RESULTS.** A number of developments has been performed dealing with the control tools and technological documentation. They allow to simplify the magnetization and magnetic recording when conducting magnetic tape testing of large tanks, e.g. railroad tank cars. The novelty of technical solutions is confirmed by the author's certificates and a patent. **CONCLUSIONS.** Application of the magnetographic monitoring with pulse magnetization by the developed methodology greatly simplifies technological operations and increases detectability of such critical flaws as cracks at their early stage.

Keywords: magnetic control, magnetic stray fields, magnetographic method (magnetic tape testing), magnetic tape, defectograms

For citation: Fedyukovich G.I. Quality control of railway tank car welded joints by magnetographic method. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 1, pp. 228–238. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-228-238

¹Федюкович Геннадий Иванович, старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, e-mail: fedyukov_gi@irgups.ru

Gennady I. Fedyukovich, Senior Lecturer of the Department of Railway Cars and Rolling Stock, e-mail: fedyukov_gi@irgups.ru



Введение

Вагонное хозяйство с его основой – вагонным парком, является одной из главных и сложных отраслей железнодорожного (ЖД) транспорта [1]. Современные виды тяги позволяют формировать тяжеловесные грузовые поезда, развивать большие скорости движения и осуществлять безостановочные пробеги на большие расстояния. Это определяет высокие требования к обеспечению надежности и долговечности конструкций вагонов, осуществлению контроля за их состоянием в короткие сроки, в том числе в неудобных условиях осмотра на станциях. Таким образом, обеспечение безопасности движения является важнейшим требованием к устройству и содержанию вагонов.

Железнодорожные цистерны, предназначенные для перевозки различных по своим свойствам грузов, имеют существенное различие как по конструкции, так и по отдельным узлам и элементам, в них возможно разное сочетание составных частей. Например, котлы цистерн по стандарту, предназначенные для перевозки опасных грузов, должны быть оборудованы предохранительными клапанами, устройствами контроля уровня налива и другими устройствами, необходимыми для безопасного и экологически чистого транспортирования, погрузки и выгрузки грузов².

Контроль качества сварных соединений таких котлов проводят в соответствии с требованиями Правил безопасности³ (далее – Правила), где указано, что «организация-изготовитель (доизготовитель), монтажная или ремонтная организация обязаны применять такие виды и объемы контроля своей продукции, которые гарантировали бы выявление недопусти-

мых дефектов, ее высокое качество и надежность в эксплуатации». Качество сварных соединений считается неудовлетворительным, если в них при любом виде контроля будут обнаружены внутренние или наружные дефекты, выходящие за пределы норм, установленных этими Правилами.

Для обеспечения безопасности на транспорте ведется поиск и разработка новых методов неразрушающего контроля (НК), широко внедряются достижения науки и техники с элементами механизации и автоматизации технологических операций. В этом направлении одно из ведущих мест занимает магнитный вид НК, основанный на намагничивании объекта контроля (ОК) до состояния, когда в области дефектов создаются магнитные поля рассеяния (МПР). Для регистрации МПР от дефектов и их идентификации широко используются такие методы контроля, как магнитопорошковый и феррозондовый.

Кроме названных Правила предусматривают применение и других методов: акустическая эмиссия, магнитография, цветная дефектоскопия, определение содержания в металле шва ферритной фазы. Эти методы применяют в соответствии с техническими условиями (ТУ) организации-изготовителя в объеме, предусмотренном нормативной документацией.

При магнитографии (магнитографический контроль – МГК) в качестве чувствительного элемента для регистрации МПР от дефектов используется промежуточный магнитоноситель – магнитная лента. Метод МГК был разработан специально для контроля качества стыковой сварки при строительстве магистральных трубопроводов.

²ГОСТ Р 51659-2000. Вагоны-цистерны магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Введен 2001-07-01. Москва: Издательство стандартов, 2001. 10 с. / GOST R 51659-2000 Oil tank cars of trunk railway lines of 1520 mm gauge. General specifications. Introduced 1 July 2001. Moscow: Publishing Standards, 2001. 10 p.

³ПБ 10-115-96. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 18.04.1995 г. № 20 / PB 10-115-96. Rules for the construction and safe operation of pressure vessels: approved by the Decree of the State Committee for Supervision of Industrial and Mining Practices of the Russian Federation of 18 April 1995 no. 20.



Для этой цели были разработаны и налажено серийное производство намагничивающих и воспроизводящих устройств, а также соответствующий стандарт⁴ с техническими требованиями и нормативно-техническая документация⁵, содержащая перечень средств контроля с описанием технологических операций. Однако этот метод, обладая многими преимуществами,

по разным причинам широкого распространения не получил. Далее речь пойдет о технических решениях, позволяющих оптимизировать режимы намагничивания объекта контроля и записи топографии магнитного поля на магнитную ленту, тем самым повысить надежность, удобство и оперативность МГК.

Постановка задачи

Действующая система НК характеризуется большим разнообразием геометрических форм и размеров контролируемых объектов, а также отрицательным влиянием на результаты контроля так называемого человеческого фактора. Эти факты отражены в указании Министерства путей сообщения России «Концепция и программа работ по развитию систем неразрушающего контроля рельсов и ответственных деталей железнодорожного подвижного состава при их изготовлении и ремонте»⁶.

В Концепции определены следующие основные направления повышения эффективности систем НК объектов ЖД транспорта:

- механизация и автоматизация технологических процессов НК с целью уменьшения влияния человеческого фактора на достоверность контроля и повышения производительности труда;
- разработка и внедрение новых технологий и программируемых средств НК с повышенными функциональными возможностями;
- модернизация и сокращение но-

менклатуры средств НК;

- совершенствование метрологического обеспечения средств НК;
- повышение уровня профессиональной подготовки персонала по НК;
- улучшение условий труда дефектоскопистов.

Эффективность применения НК при выявлении опасных дефектов в деталях и узлах вагонов ЖД транспорта можно повысить путем внедрения новых проверенных технологий. На предприятиях ЖД транспорта широко используются два метода магнитного контроля: магнитопорошковый (МПК) и феррозондовый (ФЗК). Метод МПК предусматривает регистрацию МПР, возникающих в области дефекта при намагничивании контролируемой детали, с помощью частиц магнитного порошка. Этот метод, обладая высокой чувствительностью и универсальностью, остается ручным, а качество контроля зависит в основном от внимательности дефектоскописта. Применение феррозондового метода позволяет создавать системы с автоматизированным управлением технологического процесса.

⁴ГОСТ 25225-82. Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод. Введен 1983-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1983. 14 с. / GOST 25225-82. Non-destructive testing. Pipeline welded joints. Magnetographic method. Introduced 1 July 1983. Moscow: Standards Publ., 1983. 14 p.

⁵ВСН 012-88. Технорматив. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Контроль качества и приемка работ; утв. приказом Миннефтегазстроя от 27.12.1988 г. № 375; введен 01.01.1989 г. / Standard Specification. Construction of main and field pipelines. Quality control and commissioning: approved by the Order of the Ministry of Oil and Gas Construction of December 27, 1988 no. 375; introduced 1 January 1989.

⁶Концепция и программа работ по развитию систем неразрушающего контроля рельсов и ответственных деталей железнодорожного подвижного состава при их изготовлении и ремонте: указание Министерства путей сообщения России от 03.07.2003 г. № Н-668у / The concept of works on development of nondestructive testing systems of rails and critical parts of railway rolling stock under their manufacture and repair: approved by the Ministry of Railways of Russia of 3 July 2003 no. Н-668у.



Здесь МПР от дефектов регистрируются с помощью специальных магниточувствительных элементов – феррозондовых преобразователей (полемеров или градиентомеров). Для контроля назначаются в основном детали, имеющие плоские или цилиндрические поверхности. При контроле этих поверхностей сканирование происходит с теми или иными преобразователями. Контроль деталей более сложной конфигурации неизбежно сопровождается изменением зазора с деталью и нарушением ори-

ентации преобразователя относительно этой поверхности, что снижает чувствительность и создает сигналы, трудно поддающиеся расшифровке.

Целью данного исследования является разработка средств МГК с элементами механизации и автоматизации технологических процессов контроля, позволяющих уменьшить влияние человеческого фактора на достоверность дефектоскопии и повысить производительность труда при выявлении опасных дефектов.

Магнитографический метод

Предлагается к освоению следующий после МПК и ФЗК [2] метод магнитного контроля – магнитографический. В этом методе для регистрации МПР от дефектов используется промежуточный магнитоноситель (МН) – эластичная магнитная лента, которая плотно прижимается к поверхности контролируемой детали при ее намагничивании. Это позволяет исключить влияние зазора и в результате контроля получить документ, подтверждающий факт выявления дефекта, а главное – использовать эту дефектограмму для дальнейшего исследования с целью определения вида дефекта и его основных параметров.

Магнитографический метод был создан для контроля качества стыковых сварных швов при строительстве магистральных трубопроводов с толщиной стенки от 6 до 12 мм. Технологический процесс МГК включает такие основные операции, как укладка магнитной ленты на поверхность сварного шва и прижатие ее с помощью резинового пояса, а также попе-

речное намагничивание сварного шва, при котором в области дефекта (например, непровара или трещины) создается локальное МПР. Для намагничивания используется относительно тяжелое намагничивающее устройство постоянного тока. В приложенном магнитном поле происходит запись МПР на магнитную ленту, которая затем воспроизводится в виде импульсной или теневой индикации на специальных приборах типа МГК-1 с помощью вращающихся магнитных головок. При этом реализуется индукционный метод регистрации МПР, причем не с поверхности контролируемого изделия, а с магнитной ленты, что гораздо проще и надежнее.

Теоретические основы магнитографии [3] и ее практическая реализация⁷ не ограничивают путей дальнейшего развития и применения метода МГК, причем не только в области строительства магистральных трубопроводов, но и в других отраслях, где необходимо соблюдать требования промышленной безопасности.

Разработка установки для магнитной записи

Для практического применения выполнен ряд разработок в части средств контроля и технологической документации. Эти разработки позволили значительно об-

легчить процедуру намагничивания и магнитной записи при МГК цилиндрической емкостной аппаратуры. В системе ЖД транспорта этими ОК являются цистерны,

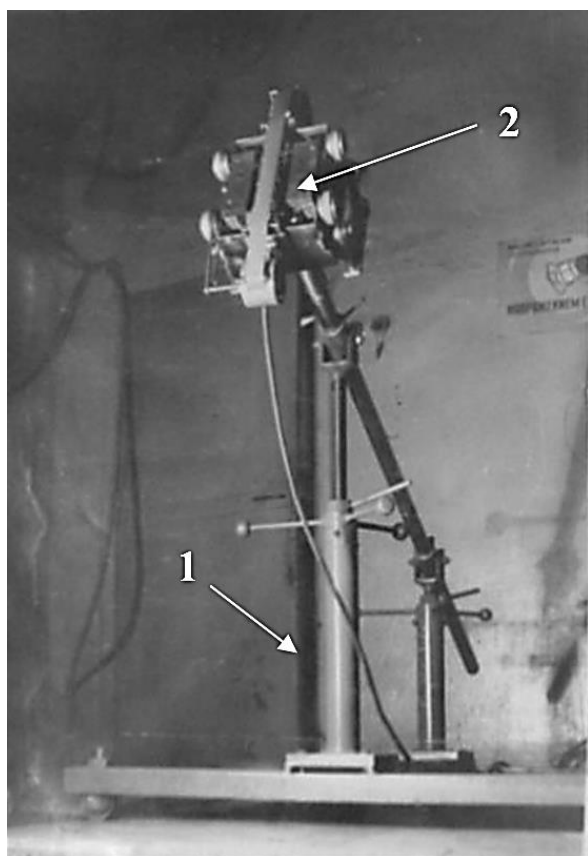
⁷ГОСТ 3242-79. Соединения сварные. Методы контроля качества. Введен 2002–05–01. Москва: Издательство стандартов, 2002. 11 с. / GOST 3242-79.Welded joints. Methods of quality control. Introduced 1 May 2002. Moscow: Standards Publ., 2002, 11p.



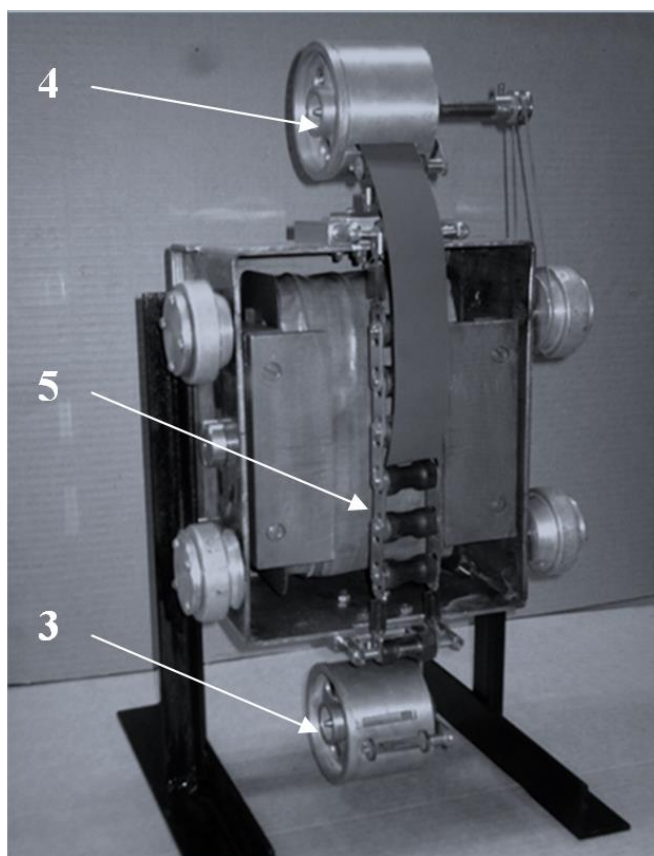
предназначенные для перевозки различных по своим свойствам жидкостей и сжиженных газов. Швы сварных соединений, являясь концентраторами внутренних напряжений, должны подвергаться неразрушающему контролю для выявления усталостных трещин, возникших как при эксплуатации, так и от некачественной сварки, которые не были выявлены при изготовлении. Для этой цели в первую очередь подходит метод МГК с теми изменениями, которые были внесены в разное время.

Элементы автоматизации применены в процедуре намагничивания и магнитной записи. На рис. 1, а показана конструкция установки 1, которая позволяет оперативно создавать и сохранять необходимую ориентацию намагничивающего устройства 2 (НУ) относительно ОК – корпуса воздухо-

сборника, на одном из заводов ООО «Химмаш». НУ прижимается к поверхности ОК в радиальном направлении так, что сварной шов находится между двух полюсов и намагничивается в поперечном направлении. В конструкцию НУ (рис. 1, б) добавлена система из двух кассет (подающая 3 и приемная 4) для магнитной ленты и роликовой цепочки 5 для поджима ее к сварному шву. Приемная кассета получает вращение через пассивик от одного из четырех колес, установленных на НУ, для сматывания магнитной ленты с записанными МПР от дефекта. В результате такой разработки значительно упростилась процедура укладки магнитной ленты на сварной шов, ее поджим к контролируемой поверхности, съем и автоматическое сматывание после проведения магнитной записи.



а



б

**Рис. 1. А – установка для МГК сварных швов; б – намагничивающее устройство:
1 – конструкция установки; 2 – намагничивающее устройство; 3 – подающая кассета;
4 – приемная кассета; 5 – роликовая цепочка**

**Fig. 1. A – Installation for magnetographic testing of welded joints; б – Magnetizing device:
1 – installation design; 2 – magnetizing device; 3 – feeding cassette; 4 – receiving cassette;
5 – roller chain**



Намагничивающее устройство

Наиболее эффективной разработкой при магнитной записи МПР на магнитную ленту является создание системы подмагничивания, которая выполнена в этой же конструкции НУ и защищена авторским свидетельством [4]. Суть изобретения заключается в том, что магнитная лента, применяемая при проведении МГК, содержит тонкий слой ферромагнитного покрытия на эластичной немагнитной основе. Этот слой имеет свою магнитную характеристику – кривую намагничивания, по которой видно, что для наиболее эффективной магнитной записи МПР от мелких дефектов необходимо путем дополнительного подмагничивания вывести рабочую точку на более крутой участок упомянутой характеристики. Практически напряженность поля подмагничивания H_0 для магнитной ленты типа МК-1 равна значению ее коэрцитивной силы H_c ($H_0 = H_c$), а при контроле изделий разной толщины изменяется величина H_0 приложенного поля, которое является подмагничивающим. Поэтому величину H_0 необходимо каждый раз корректировать.

Эту функцию в НУ (рис. 2) выполняет подмагничивающий контур в виде комплекта сменных накладных полюсов из магнитомягкой стали с острыми углами между их гранями. Например, для увеличения напряженности приложенного поля H_0 , чтобы довести ее до значения H_0 , необходимо использовать более широкие полюсы. В результате при неизменном токе намагничивания амплитуда сигнала от дефекта заметно увеличивается. Для анализа результатов контроля необходимо понимать физический процесс индукционного воспроизведения и иметь определенный опыт, чтобы на экране прибора с импульсной индикацией из реального сигнала выделять дефектную составляющую. На рис. 3 показана относительно сложная форма результирующего сигнала 1, который для облегчения расшифровки необходимо разделить на его составляющие: два импульса 2 от края ленты, широкий импульс 3 от формы валика сварного шва 3, узкий импульс 4 от дефекта.

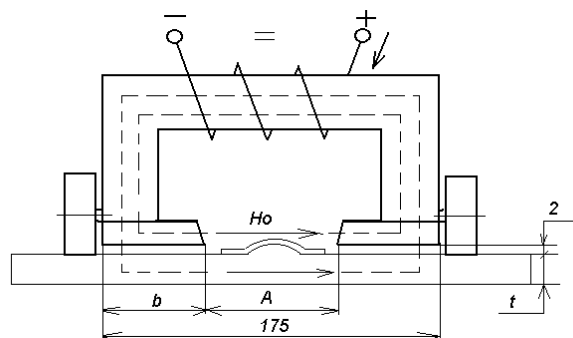


Рис. 2. Подмагничивающее поле H_0
Fig. 2. Magnetic bias field H_0

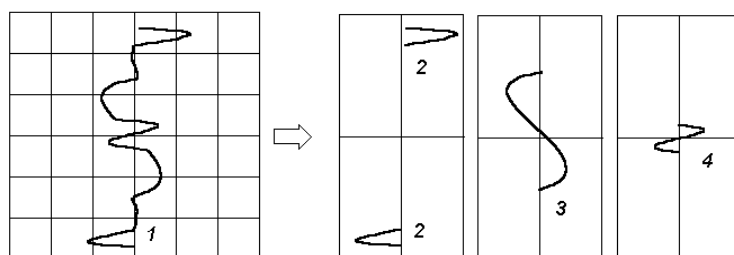


Рис. 3. Составляющие сигнала импульсной индикации
Fig. 3. Components of the pulse indication signal



Эффект управления подмагничиванием наглядно показан на рис. 4 с реальными дефектограммами. Здесь дефектограммы с наиболее оптимальными режимами магнитной записи при МГК изделий толщиной 8 мм при разных токах намагничивания располагаются по диагонали из верхнего левого положения в нижнее правое. Запись МПР от внутреннего дефекта выполнялась на предварительно намагниченную до насыщения ленту. Хорошо видно, что по мере увеличения величины H_0 подмагничивающего поля уменьшаются

импульсы от края ленты, а это свидетельствует о том, что H_0 приближается к значению H_s магнитной ленты, то есть к оптимальному режиму магнитной записи.

На основании проведенных исследований разработана методика магнитного контроля⁸, где в разделе МГК для назначения условий проведения контроля швов сварных соединений с толщиной стенки от 6 до 12 мм приведены сила тока намагничивания и ширина соответствующих пар полюсных накладок (табл. 1).

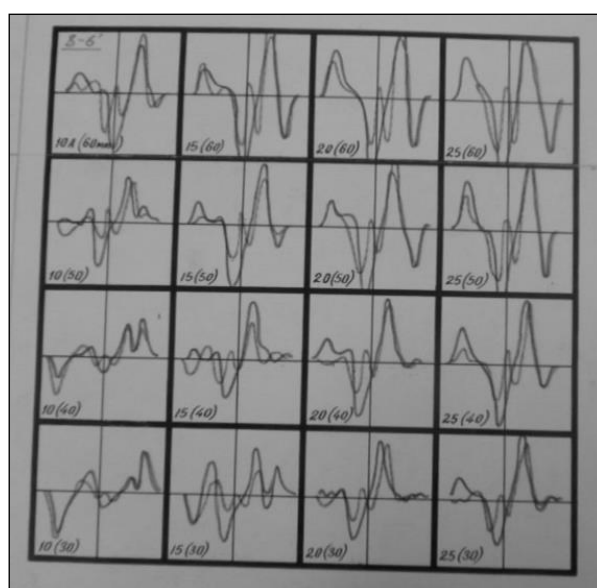


Рис. 4. Дефектограммы образца сварного шва
Fig. 4. Defectograms of a welded joint sample

Таблица 1

Значение силы тока намагничивания

Table 1

Value of the magnetization current strength

Обозначение и величина параметра намагничивания / Symbols and value of the magnetization parameter	Толщина листов сварного шва, мм / Thickness of welded joint sheets, mm			
	6	8	10	12
Сила тока I, А / Amperage I, A	15	20	24	28
Ширина полюсной накладки b, мм / Width of the pole plate b, mm	30	40	50	60

⁸СТО 00220227-02-2006. Сосуды и трубопроводы стальные сварные. Методика магнитного контроля. М.: Изд-во ОАО «НИИХиммаш», 2006. / STO 00220227-02-2006. Stainless Steel Welded Vessels and Pipelines. Methods of Magnetic Control. M.: OJSC "NIIHimmash" Publ., 2006.



Новый способ МГК

Другой разработкой по совершенствованию методики контроля с получением аналогичных результатов является способ МГК на частично намагниченную ленту [5]. Дело в том, что по действующей методике МГК рекомендуется делать выбор типа магнитной ленты в зависимости от напряженности приложенного магнитного поля H_p , то есть необходимо иметь большой набор магнитных лент с разными значениями H_c , а также со своими индивидуальными кривыми намагничивания и петлями магнитного гистерезиса.

Возникает вопрос: что делать, если промышленность выпускает только один тип магнитных лент? В качестве прототипа

использовалось известное техническое решение, от которого новый способ отличается тем, что уровень предварительного намагничивания ленты назначают не до насыщения, а в зависимости от измеренного значения H_p . В результате один тип магнитной ленты заменяет целое семейство кривых намагничивания, у которых нулевая (начальная) точка находится в диапазоне магнитных индукций от нуля до величины остаточной магнитной индукции B_r (максимальной B_r). Контрольным признаком правильного выбора является результирующий сигнал, у которого импульсы от края ленты скомпенсированы до минимума.

Совмещенный магнитоскоп

Технический прогресс невозможен без постоянного поиска технических решений по созданию малогабаритных дефектоскопов с целью повышения удобства контроля и сокращения времени на обработку результатов. К одной из таких находок относится компактная конструкция магнитоскопа [6], которая при изготовлении опытного образца, его испытании и внесении необходимых доработок может войти в серийное производство. На рис. 5 показан макет магнитоскопа, который имеет колесо с одной спицей, П-образный электромагнит и магниточувствительные элементы (например, феррозондовые преобразователи). В ободу колеса по длине его окружности уложен отрезок магнитной ленты. Колесо магнитоскопа во время работы про-

катывают на один оборот вдоль сварного шва, при этом происходит запись МГР, так как электромагнит в это время должен быть включен. Далее колесо с помощью ручки отрывают от контролируемой поверхности и оно под действием спиральной пружины возвращается в исходное положение. На обратном обороте выключается электромагнит, но включаются феррозондовые датчики для считывания магнитной записи. Результаты контроля отображаются или записываются на портативном приборе типа одного из тех, что показаны на рис. 6. Такое краткое описание магнитоскопа является основой для технического задания на разработку промышленного магнитографического дефектоскопа.



Рис. 5. Макет магнитоскопа
Fig. 5. Magnetoscope prototype model



Рис. 6. Варианты индикаторов
Fig. 6. Alternative indicators

Методика контроля

Технологию проведения МГК можно проследить из всего того, что изложено выше. Однако будет понятнее, если ее представить в более наглядном виде. Процесс МГК состоит из пяти технологических операций (ТО), каждая из них имеет три варианта исполнения (табл. 2). При оформлении задания на контроль выбирается только один вариант из каждой операции.

Первая ТО – состояние ОК. Дефектоскопист должен оценить параметры шероховатости контролируемой поверхности и по этим данным выбрать тот или иной вариант. По параметру шероховатости

можно оценить чувствительность контроля: ширина выявляемой поверхностной трещины примерно равна параметру R_a .

Вторая ТО – выбор магнитного поля – это более расширенная ТО по сравнению с ранней редакцией методики, где предусматривалось указать лишь вид намагничивания и только переменным магнитным полем. Теперь для намагничивания ОК можно применять еще переменное или импульсное поле, что значительно расширило возможности МГК.

Третья ТО – подготовка магнитоносителя (магнитной ленты), эти варианты раскрыты выше.

Таблица 2

Последовательность операций МГК

Table 2

Sequence of magnetographic testing operations

Состояние ОК / Condition of the monitored object	Магнитное поле / Magnetic field	Подготовка МН / Preparation	Воспроизведение / Playback	Размагничивание / Demagnetization
1. Без обработки / Without processing 2. Обработка Ra 10 / Processed by Ra 10 3. Обработка Ra 2,5 / Processed by Ra 2,5	1. Постоянное / Constant 2. Переменное / Alternating 3. Импульсное / Pulsed	1. Чистая лента / Blank tape 2. Частичное НМ / Partial magnetiza- tion 3. Полное НМ / Complete magnet- ization	1. Импульсное / Pulsed 2. Двойное импульсное / Double pulsed 3. Феррозондовое / Ferroprobe	1. Без размагничи- вания / Without demagnetization 2. Поверхностное / Surface 3. Объемное / Volumetric



Четвертая ТО – воспроизведение магнитной записи. Здесь выбор варианта определяется типом воспроизводящего прибора. Необходимо пояснить вариант двойного импульсного воспроизведения, в основу которого положено изобретение нового считывающего устройства [7]. При считывании (воспроизведении) магнитной записи с магнитной ленты используется не одна, а две индукционные головки, установленные на вращающемся барабане. Головки установлены на барабане диаметрально противоположно с возможностью перемещения вдоль его образующей, и за один оборот барабана на экране прибора воспроизводятся два сигнала. При раздвижении сигналов в разные стороны в местах начала и конца дефекта на экране прибора два сложных сигнала, которые по форме совпадали, в этих местах начинают раздваиваться, позволяя дефектоскописту более уверенно анализировать результаты контроля. Для феррозондового воспроизведения рекомендуется использовать серийные дефектоскопы типа ДФ-201.1 или Ф-205.30Ф, тем самым расширяя область их применения. Объемное размагничивание применяют с использованием электромагнитов постоянного тока.

Последняя, пятая ТО – размагничивание ОК. Обязательному размагничиванию подлежат изделия из магнитотвердых сталей, у которых параметр коэрцитивной силы H_c больше 10 А/см. К поверхностному размагничиванию относится процесс с применением соленоидов, питаемых переменным током промышленной частоты. Такое размагничивание можно применять для изделий с толщиной стенки, соизмеримой с глубиной проникновения переменного магнитного поля. Импульсное размагничивание, при котором глубина проникновения такого поля еще меньше, имеет ограниченное применение.

Для условного обозначения методики контроля можно использовать «шифр» в виде пяти цифр, где каждая цифра указывает вариант ТО.

Например, МГК-13231 означает, что проводится (или уже проведен, если оформляется протокол контроля) контроль сварного шва без механической обработки его поверхности; используется частично намагниченная лента, которая укладывается направлением Вг навстречу импульсному полю; при воспроизведении магнитной записи применяется феррозондовый дефектоскоп; после контроля размагничивание не требуется, так как сварке подвергаются в основном детали из малоуглеродистых (магнитомягких) сталей (см. табл. 2). С помощью такой таблицы можно определить количество возможных технологических процессов МГК – это 243 процесса (три варианта в пятой степени – по числу ТО).

Приведенный пример (МГК-13231) взят не случайно. В этом технологическом процессе соединились два способа контроля – способ приложенного поля (СПП) и способ остаточной намагниченности (СОН). По действующим методикам для контроля малоуглеродистых сталей нельзя применять СОН, а при импульсном намагничивании нельзя применять СПП. При импульсном намагничивании сварного шва в области дефекта создаются МПР с очень коротким временем действия, что не позволяет применить МПК, но на магнитной ленте в это время успешно создается участок с остаточной намагниченностью. Получилось так, что для данного сварного шва с минимальным значением H_c при импульсном намагничивании – это СПП, а для магнитной ленты с высоким значением H_c – это СОН. Таким образом, этот вариант МГК позволяет широко использовать его на практике и в учебном процессе. При этом для намагничивания не требуются тяжелые электромагниты, здесь можно использовать циркулярное намагничивание с помощью удобных и легких контактных электродов или продольное – с помощью обмоточного кабеля. Электроды и кабель подключаются к серийному импульсному блоку, например, от дефектоскопа ПМД-70.



Заключение

Метод МГК, который в настоящее время необоснованно начинает забываться, можно и даже необходимо «реанимировать», что позволит решить многие поставленные задачи.

В этом направлении решены следующие основные задачи:

- найдена технологичная конструкция контрольных образцов, имитирующих сварные швы с внутренними дефектами с целью метрологических проверок;
- дополнены варианты процесса намагничивания контролируемых деталей с проверкой его параметров на образцах по выявлению внутренних дефектов;
- улучшена запись МПР от дефектов

на магнитную ленту с выбором варианта технологической операции (см. табл. 2);

– используются разные варианты воспроизведения записанных дефектограмм, которые сохраняются в качестве объективных доказательств о выявлении недопустимых дефектов;

– определены основные требования к намагничивающим устройствам для организации их серийного производства;

– обоснована необходимость проведения исследований и разработки методики МГК для других деталей подвижного состава ЖД транспорта, согласование и утверждение ее в установленном порядке.

Библиографический список

1. Шадур Л.А. Вагоны. 3-е изд., перераб и доп. М.: Транспорт, 1980. 439 с.
2. Козлов В.С. Физика магнитографической дефектоскопии. Минск: Наука и техника, 1968. 160 с.
3. Хусанов М.Х. Магнитографический контроль сварных швов. М.: Недра, 1973. 215 с.
4. А. с. № 412542, МПК G01N27/82. Намагничивающее устройство для магнитографической дефектоскопии / Г.И. Федюкович (СССР). № 1644252/25-28; заявл. 20.04.1971; опубл. 25.01.1974, Бюл. № 3.
5. А. с. № 794458, МПК G01N27/82. Способ магнитографического контроля / Г.И. Федюкович (СССР). № 2735947/25-28; заявл. 11.03.1979; опубл.

07.03.1981, Бюл. № 1.

6. Пат. № 2186382, Российская Федерация, МПК G01N27/82. Магнитоскоп / Г.И. Федюкович; заявитель и патентообладатель ОАО «Иркутский Химмаш». № 99128000/28; заявл. 10.10.2001; опубл. 27.07.2002.

7. А. с. № 648898, СССР, МПК G01N27/82. Считывающее устройство магнитографического дефектоскопа для контроля сварных соединений / М.М. Шель, В.Ф. Мужикский, Г.И. Федюкович; заявитель и патентообладатель Предприятие П/Я Р-6729. № 2528355/25-28; заявл. 29.09.1977; опубл. 25.02.1979, Бюл. № 7.

References

1. Shadur L. A. *Vagony* [Railroad car]. Moscow: Transport Publ., 1980, 439 p. (In Russian)
2. Kozlov V.S. *Fizika magnitograficheskoy defektoskopii* [Physics of magnetic-tape testing]. Minsk: Science and technology Publ., 1968, 160 p. (In Russian)
3. Husanov M.H. *Magnitograficheskij kontrol' svarnyh shvov* [Magnetographic testing of welded joints]. Moscow: Nedra Publ., 1973, 215 p. (In Russian)
4. Fedyukovich G.I. *Namagnichivayushchee ustrojstvo dlya magnitograficheskoy defektoskopii* [Magnetizing device for magnetic tape testing]. Patent USSR, no. 412542, 1974. (In Russian)

Критерии авторства

Федюкович Г.И. полностью подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

5. Fedyukovich G.I. *Sposob magnitograficheskogo kontrolya* [The method of magnetographic testing]. Patent USSR, no. 794458, 1981. (In Russian)

6. Fedyukovich G.I. *Magnitoskop* [Magnetoscope]. Patent RF, no. 2186382, 2002.

7. Shel' M.M., Muzhickij V.F., Fedyukovich G.I. *Schityvayushchee ustrojstvo magnitograficheskogo defektoskopa dlya kontrolya svarnyh soedinenij* [Reading device of the magnetographic flaw detector for welded joint control]. Patent USSR, no. 648898, 1979. (In Russian)

Authorship criteria

Fedyukovich G.I. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 04.12.2017 г.

The article was received 04 December 2017

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставляется одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлены в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-119.

Телефон: **(3952) 40-59-27** – Сокольников Татьяна Васильевна, ответственный за выпуск,
(3952) 40-58-57.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: vestnik@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 1 (132) 2018

Редакторы О.А. Терновская, Я.В. Макшанцева,
В.П. Карнаухова

Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Т.В. Сокольников
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка А.В. Куртовой

Выход в свет 23.01.2018 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 30,5.
Тираж 500 экз. Заказ 28. Поз. плана 3н.

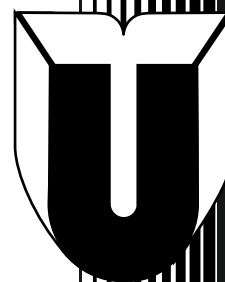
Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный исследовательский технический университет
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018

