

Том 22, № 2

2018

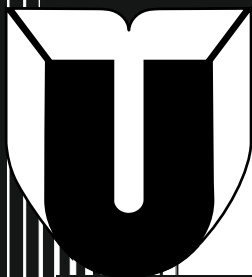
ISSN 1814-3520 (print)
ISSN 2500-1590 (online)

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, № 2

2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 22, № 2

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 З.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. 2

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)

BOROVIKOV 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 Z.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

- ❑ Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Шероховатость поверхности при обработке полимерно-абразивными кругами..... 10
- ❑ Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Математическая модель формирования среднеарифметического отклонения профиля поверхности при дробеударной обработке..... 26

Информатика, вычислительная техника и управление

- ❑ Аршинский В.Л., Аршинский Л.В., Доржсурэн Хишигсурэн. Методика агрегированной оценки состояния производственно-экономической системы на примере станции Улан-Баторской железной дороги..... 34
- ❑ Жарков М.Л. Математическая модель и программный комплекс для определения статистических параметров пассажиропотоков в транспортных системах..... 45
- ❑ Илющенко В.В. Анализ методики создания и инструментальных средств разработки систем искусственного интеллекта..... 57
- ❑ Петров А.В. Структурные функции в генерировании бинарного случайного процесса перестановочными методами..... 67
- ❑ Побединский В.В., Сиваков В.П. Нечеткое моделирование процесса выгрузки технологической щепы..... 75
- ❑ Чубич В.М., Прокофьева А.Э. Параметрическая идентификация стохастических линейных дискретных систем на основе робастной фильтрации..... 84

Энергетика

- ❑ Болоев Е.В., Голуб И.И., Федчишин В.В. Оценивание состояния распределительной сети низкого напряжения по измерениям интеллектуальных счетчиков..... 95
- ❑ Константинов Г.Г., Фам Конг Тао, Киселев В.И. Компьютерная модель преобразователя для зарядно – разрядного комплекса аккумуляторных батарей..... 107

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- **Лачков Г.Г.** О критериях оценки вариантов развития системообразующей электрической сети..... 123
- **Солопов Р.В., Самульченков А.С.** Применение генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети..... 131
- **Федотова Г.А., Шер И.А.** Современные проблемы стандартизации надежности в технике..... 142



Металлургия и материаловедение



- **Горланов Е.С., Уголков В.Л.** К вопросу о низкотемпературном синтезе диборида титана..... 153
- **Смирнов А.Н., Алексеев Д.И.** Анализ математических моделей по управлению показателями качества кокса М25, М10, применяемых на коксохимических предприятиях России..... 166
- **Солихов М.М., Аксёнов А.В., Васильев А.А., Каримов М.И., Рахманов О.Б.** Поиск оптимальной технологической схемы переработки упорных золотосодержащих руд месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан)..... 182



Транспорт



- **Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М.** Несущая система экраноплана схемы «тандем» и ее аэродинамические характеристики..... 193
- **Казимиров А.О., Бурков Д.Г.** Прогнозирование интенсивности транспортных и пешеходных потоков к центрам массового тяготения на примере супермаркетов г. Иркутска..... 209
- **Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Агафонов В.М., Линьков А.О., Шрамко С.Г., Яговкин Д.А., Устинов Р.И.** Оценка сходимости характеристик разработанных моделей рельсового пути для исследования нового способа определения растягивающих усилий... 217
- **Свирбутович О.А., Елтошкина Е.В., Ильин П.И.** Исследование зависимости смещения тела и амплитуды управления колебаниями объекта виброзащиты колесных транспортных средств..... 230

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 2

2018

CONTENTS



Mechanical Engineering and Machine Science

-  **Dimov Yu.V., Podashev D.B.** Surface roughness under machining by polymer abrasive wheels..... 10
-  **Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A.** Mathematical model of surface profile arithmetic mean deviation formation at shot peen forming... 26



Information Science, Computer Engineering and Management

-  **Arshinsky V.L., Arshinsky L.V., Dorzhsuren Khishigsuren.** Methods of production-economic system aggregate assessment on example of Ulan Bator railway station..... 34
-  **Zharkov M.L.** Mathematical model and program complex to determine statistical parameters of passenger flows in transport systems..... 45
-  **Ilyushchenko V.V.** Analysis of methods and tools of artificial intelligence system development 57
-  **Petrov A.V.** Structural functions in binary random process generation by permutation methods..... 67
-  **Pobedinsky V.V., Sivakov V.P.** Fuzzy modeling of pulpchip discharge..... 75
-  **Chubich V.M., Prokofieva A.E.** Parametric identification of stochastic linear discrete systems based on robust filtering..... 84



Power Engineering

-  **Boloev E.V., Golub I.I., Fedchishin V.V.** Low voltage distribution network state estimation based on smart meter readings..... 95
-  **Konstantinov G.G., Pham Kong Tao, Kiselev V.I.** Computer model of a converter for the storage battery charge-discharge complex..... 107



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

CONTENTS



Power Engineering



- **Lachkov G.G.** On evaluation criteria for backbone electrical network development variants..... 123
- **Solopov R.V., Samulchenkov A.S.** Application of genetic algorithm for electric circuit steady-state response calculation..... 131
- **Fedotova G.A., Sher I.A.** Current problems of reliability standardization in engineering..... 142



Metallurgy and Materials Science



- **Gorlanov E.S., Ugolkov V.L.** To the low-temperature synthesis of titanium diboride..... 153
- **Smirnov A.N., Alekseev D.I.** Analysis of mathematical control models of coke quality parameters M_{25} and M_{10} applied at Russian metallurgical coke production enterprises..... 166
- **Solikhov M.M., Aksenov A.V., Vasiliev A.A., Karimov M.I., Rakhmanov O.B.** Search for optimal processing technology for Taror deposit refractory gold ores (Republic of Tajikistan)..... 182

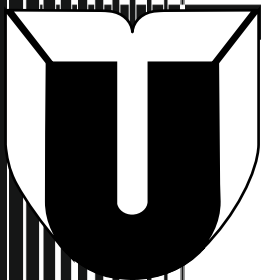


Transport



- **Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Krivel S.M.** Carrying system of the ground-effect vehicle of «tandem» scheme and its aerodynamic characteristics..... 193
- **Kazimirov A.O., Burkov D.G.** Forecasting intensity of traffic and pedestrian flows to the centers of mass attraction on example of supermarkets in Irkutsk..... 209
- **Melnichenko O.V., Portnoy A.Yu., Agafonov V.M., Linkov A.O., Shramko S.G., Yagovkin D.A., Ustinov R.I.** Evaluation of developed railroad track model characteristics convergence to study a new method of tensile force determination..... 217
- **Svirbutovich O.A., Eltoshkina E.V., Ilyin P.I.** Dependency study of body displacement and control amplitude of vibration protection object oscillations of wheeled vehicles..... 230





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 621. 923: 621.922

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-10-25>

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ

© Ю.В. Димов¹, Д.Б. Подашев²

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Установить закономерности влияния параметров обработки поверхности (скорости резания, подачи и деформации инструмента) полимерно-абразивными кругами на шероховатость обработанной поверхности и разработать математическую модель ее формирования. **МЕТОДЫ.** Исследования проводились аналитическими и экспериментальными методами на кругах компании 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company) марок Scotch-Brite™ FS-WL, DB-WL, CF-FB различной зернистости. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Разработана математическая модель формирования шероховатости, основанная на взаимодействии режущего микрорельефа эластичного абразивного круга с обрабатываемой поверхностью. При взаимодействии режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью абразивные зерна внедряются в обрабатываемый материал. По заданным механическим свойствам обрабатываемого материала и вертикальной составляющей силы резания определена средняя глубина внедрения зерен с учетом наплыва и упругого восстановления царапин. Эта глубина является высотой неровностей обработанной поверхности. Проверка скоростей резания и подачи на образцах из сплава В95пчТ2 при различных деформациях круга показала хорошее совпадение экспериментальных результатов с теоретическими. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработанная теория формирования микрогеометрии поверхности детали позволяет аналитически определить шероховатость по известным параметрам инструмента в зависимости от режимов обработки. При оптимизации технологического процесса данная математическая модель может быть использована как ограничительная функция для достижения заданного критерия оптимизации, например, целевой экономической функции.

Ключевые слова: полимерно-абразивный круг, математическая модель, режущий микрорельеф, глубина внедрения зерен, параметр шероховатости.

Информация о статье. Дата поступления 15 января 2018 г.; дата принятия к печати 12 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Шероховатость поверхности при обработке полимерно-абразивными кругами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 10–25. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-10-25

SURFACE ROUGHNESS UNDER MACHINING BY POLYMER ABRASIVE WHEELS

Yu.V. Dimov, D.B. Podashev

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

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to determine the influence patterns of the parameters of surface machining (cutting speed, tool feed and deformation) by polymer abrasive wheels on the roughness of the machined surface and develop a mathematical model of microrelief formation of this surface. **METHODS.** The study involves analytical and experimental methods using the wheels of the company 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company) of the brands Scotch-Brite™ FS-WL, DB-WL, CF-FB of different coarseness. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** We have developed a mathematical model of roughness formation based on the interaction of an elastic abrasive wheel cutting microrelief and a machined surface. Abrasive grains are introduced into the machined material under cutting microrelief interaction with the processed surface. The average depth of grain introduction has been determined by the set mechanical

¹Димов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, e-mail: Dimov-Ura@yandex.ru

Yuriy V. Dimov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering, e-mail: Dimov-Ura@yandex.ru

²Подашев Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, e-mail: dbp90@mail.ru

Dmitriy B. Podashev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering, e-mail: dbp90@mail.ru



properties of the machined material and the vertical component of the cutting force taking into account lapping and elastic recovery of scratches. This depth is represented by the height of the machined surface roughness. Experimental check of the cutting speed and feed on the samples made of V95pchT2 alloy at various deformations of a wheel has shown close agreement of experimental and theoretical results. **CONCLUSION.** The developed theory of part surface microgeometry formation allows analytical determination of roughness by the known parameters of the tool depending on the processing modes. Having optimized the technological process, this mathematical model can be used as a restricting function for the achievement of the set optimization criterion, for example, the criterion of target economic function.

Keywords: *polymeric abrasive circle, mathematical model, cutting microrelief, depth of grain introduction, roughness parameter.*

Article info. Received January 15, 2018; accepted February 12, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Dimov Yu.V., Podashev D.B. Surface roughness under machining by polymer abrasive wheels. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 10–25. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-10-25

Введение

Механизация и автоматизация операций финишной обработки деталей актуальны для современного машиностроения.

Эластичные абразивные круги применяются для: финишной обработки с целью придания обрабатываемой поверхности требуемой шероховатости, подготовки ее под лакокрасочные покрытия, удаления заусенцев, скругления острых кромок, предварительной обработки перед полированием и гляncеванием и т.п. При этом обрабатываться могут различные металлы и их сплавы, пластмасса, дерево, стекло, керамика и камни.

Полимерно-абразивные инструменты, как отмечено в работах [1–5], являются весьма эффективными для финишной обработки деталей в самолетостроении, ракетостроении и других высокотехнологичных отраслях. Успешное применение полимерно-абразивных кругов при финишной обработке рассмотрено в [6–9].

Однако попыток математического моделирования формирования микрорельефа обработанной поверхности в перечисленных работах не было. Поэтому *целью данного исследования* является разработка математической модели формирования шероховатости поверхности при обработке эластичными абразивными кругами и экспериментальное подтверждение аналитически полученных результатов. Для обоснованного выбора инструментов и параметров обработки необходимы знания об их влиянии на процесс формирования обрабатываемой поверхности.

Методы исследования

Для исследований использовались эластичные абразивные круги компании 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company), изготовленные из абразивного материала Scotch-Brite™. Этот материал состоит из синтетических волокон, образующих трехмерное нетканое полотно, по всему объему которого равномерно распределены абразивные зерна.

В маркировке прессованных эластичных кругов FS-WL 8A MED, FS-WL 6S FIN, FS-WL 2S CRS, DB-WL 8S MED (рис. 1 а, б, в) цифрами 8, 7, 6, 2 обозначена структура, буквенными литерами – абразивный материал: А – Al_2O_3 ; S – SiC. Также есть указания на зернистость: FINE – тонкое зерно, соответствующее 45–50 мкм, MEDIUM (MED) – среднее зерно, соответствующее 50–60 мкм, COARSE (CRS) – грубое зерно, соответствующее ~200 мкм. Например, круг CF-FB 0,5A FIN (рис. 1 в) – очень эластичная щетка из лепестков материала типа Clean & Finish для чистовой обработки с абразивным материалом Al_2O_3 зернистостью FINE (45–50 мкм).



Рис. 1. Прессованные круги марок: FS-WL (a); DB-WL (b); CF-FB (c)
Fig. 1. Brands of compact wheels: FS-WL (a); DB-WL (b); CF-FB (c)

Параметры эластичных абразивных кругов приведены в табл. 1, где D_k – диаметр круга, мм; B_k – ширина круга, мм; r_k – радиус втулки круга, мм; d_k – диаметр отверстия, мм; M_k – масса круга, кг; γ_k – плотность материала круга, кг/м³.

Таблица 1

Параметры эластичных абразивных кругов

Table 1

Parameters of elastic abrasive wheels

Круг / Wheel	D_k , мм / mm	B_k , мм / mm	r_k , мм / mm	d_k , мм / mm	M_k , кг / kg	γ_k , кг/м ³ / kg/m ³	Абразив / Abrasive	Зернистость Z, мкм / Coarseness Z, μm
FS-WL-8AMED	140,5	26	17,5	25,4	0,278	712,77	Al ₂ O ₃	50–60
FS-WL-6SFIN	129,5	25,5	17,5	25,4	0,162	501,63	SiC	45–50
FS-WL-2SCRS	147,2	26	17,5	25,4	0,162	377,37	SiC	~200
DB-WL-8SMED	147,8	25,6	17,5	25,4	0,284	666,29	SiC	50–60
CF-FB-0,5AFIN	193	50	45	76,5	0,418	339,03	Al ₂ O ₃	45–50

В проводимом исследовании в качестве обрабатываемого материала был принят высокопрочный алюминиевый сплав В95пчТ2 с пределом текучести $\sigma_T = 50$ МПа, модулем упругости первого рода $E = 7000$ МПа и коэффициентом Пуассон $\mu = 0,34$.

Независимо от исходного состояния поверхности в процессе обработки формируется достижимая шероховатость, параметры которой зависят от условий обработки и свойств обрабатываемого материала. Если шероховатость поверхности до обработки была меньше достижимой, то в процессе обработки она увеличивается; если больше, то уменьшается до значения достижимой.

Математическая модель формирования шероховатости

В основу формирования шероховатости обработанной поверхности положено взаимодействие режущего микрорельефа эластичного абразивного инструмента с поверхностью заготовки.

Режущий микрорельеф абразивного инструмента, по данным, представленным в работах [10, 11], может быть описан в виде случайного стационарного процесса с нормальным распределением. Профилограмма в этом случае будет являться реализацией данного случайного процесса. Параметрами, которые необходимы для расчета взаимодействия режущего



микрорельефа с обрабатываемой поверхностью, являются: среднее квадратичное отклонение профиля σ , число максимумов m и число нулей (пересечений со средней линией) $n(0)$.

Для кругов, использованных в данных исследованиях, эти параметры приведены в табл. 2 [12].

Таблица 2

Параметры микрорельефа кругов

Table 2

Parameters of wheel microrelief

Марка круга / Wheel brand	Зернистость, мкм / Coarseness, μm	Особые точки микрорельефа / Special points of microrelief		
		σ , мкм / μm	m , мкм ⁻¹ / μm^{-1}	$n(0)$, мкм ⁻¹ / μm^{-1}
FS-WL-8AMED	50–60	62,579	$3,04 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$
FS-WL-6SFIN	45–50	55,471	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-3}$
FS-WL-2SCRS	200	85,807	$1,96 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$
DB-WL-8SMED	50–60	30,950	$4,09 \cdot 10^{-3}$	$2,94 \cdot 10^{-3}$
CF-FB-0,5AFIN	45–50	74,107	$3,22 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$

При взаимодействии режущего микрорельефа в сечении круга, имеющего среднюю линию в зоне контакта с деталью m_1m_1 (рис. 2), с идеально гладкой обрабатываемой поверхностью (линия m_2m_2) абразивные зерна внедряются в обрабатываемый материал.

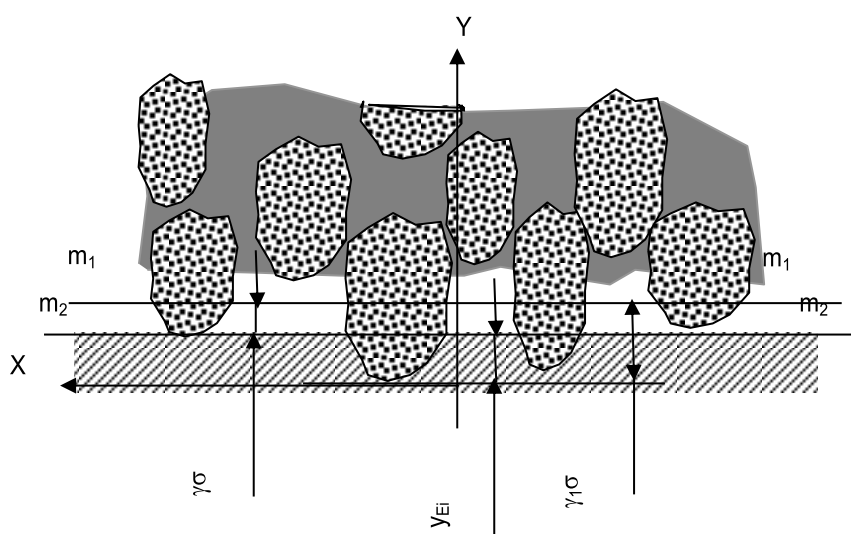


Рис. 2. Схема взаимодействия эластичного круга с обрабатываемой деталью

Fig. 2. Diagram of elastic wheel interaction with the machined part

Значение сближения и расстояние любой точки поверхности m_2m_2 до средней линии микрорельефа m_1m_1 удобнее выражать в относительных величинах – $\gamma = y/\sigma$.

При разработке математической модели формирования микрорельефа обрабатываемой заготовки положено взаимодействие единичного зерна с обрабатываемой поверхностью. В качестве модели единичного зерна принят конус с закругленной по радиусу вершиной.

При внедрении зерна под углом к поверхности впереди него образуется валик наплыва (рис. 3), который при определенных условиях может переходить в стружку. Пластически отесненный материал, обтекая зерно без отделения от основной массы, образует наплыв по его боковым сторонам.

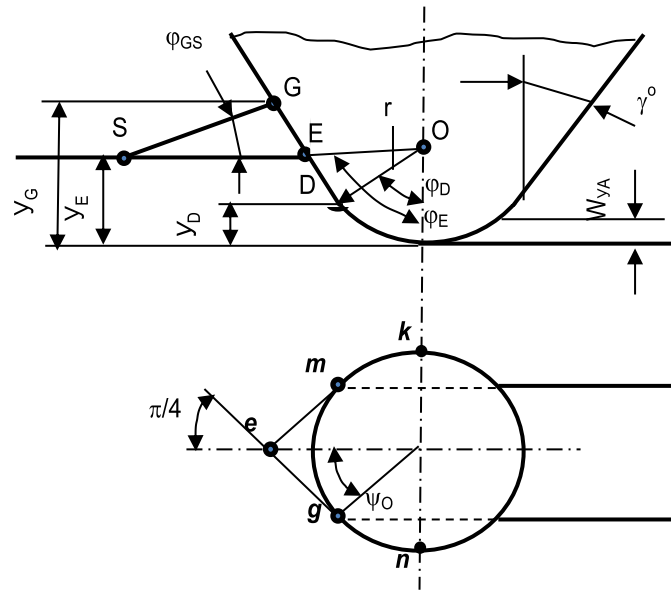


Рис. 3. Взаимодействие модели единичного зерна с обрабатываемой поверхностью
Fig. 3. Interaction of a single grain model with the machined surface

На рис. 3 введены следующие обозначения: r – радиус закругления зерна; Y_E – глубина внедрения зерна; Y_D – глубина внедрения до точки перехода сферической части в коническую; Y_G – глубина внедрения с учетом напыва; φ_{GS} – угол напыва; W_{YA} – упругое восстановление материала; γ^0 – угол конуса; mg – участок, на котором происходит стружкообразование; D – точка перехода сферической части в коническую; mk и gn – участки, на которых при движении зерна материал пластически оттесняется в напыв.

Высота неровностей по 10-ти точкам R_z представляет собой среднюю глубину внедрения зерен с учетом напыва и упругого восстановления царапин:

$$R_z = Y_G - W_{YA}.$$

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a зависит от R_z в следующем соотношении:

$R_a = 0,25R_z$ при $R_z = 320-8$ мкм; $R_a = 0,20R_z$ при $R_z = 6,3-0,05$ мкм.

Среднее квадратичное отклонение определяется по выражению

$$\sigma_{II} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot R_a.$$

При внедрении абразивных зерен в пределах сферической части модели абразивного зерна с учетом напыва Y_G (по данным работы [10]) глубина определяется по уравнению

$$Y_G = Y_E + r \cdot \sqrt{\frac{2[A_E - \sin\psi_0 \cdot (A_E - A_0)]}{\operatorname{ctg}\varphi_{GS} + \operatorname{ctg}\varphi_E}}$$

при $Y_E \leq Y_D$,

где Y_E – глубина внедрения абразивных зерен; $A_E = 0,5\varphi_E - 0,25\sin 2\varphi_E$; $A_0 = 0,5\varphi_0 - 0,25\sin 2\varphi_0$; $\varphi_0 = 0,5\arccos \cos 2\mu_T$; μ_T – коэффициент пластического трения; $\varphi_E = 0,5\arccos(1 - Y_E/r)$;



$$\varphi_{GS} = \frac{\sin \varphi_E}{2 \sin \varphi_0} \left(\frac{-\sin \varphi_0 - K^1 \sqrt{2} + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 + 2K^1 (\sqrt{2} \sin \varphi_0 + \cos \varphi_E)}}{\cos \varphi_E - K^1} \right)$$

при $Y_E \leq Y_D$,

где $K^1 = \frac{2}{\varphi_E^2 \sin \varphi_E} \cdot [A_E - \sin \psi_0 \cdot (A_E - A_0)]$; $\psi_0 = \pi/4 - 0,5 \arccos 2\mu_T$.

Если внедрение зерна войдет в коническую часть модели абразивного зерна, то Y_G определяется по следующему уравнению:

$$Y_G = Y_E + r \cdot \sqrt{\frac{L_Y}{\operatorname{ctg} \varphi_{GS} + \operatorname{tg} \gamma^0}}$$

при $Y_E > Y_D$,

где $L_Y = 2 \left[A_D - \sin \psi_0 \cdot (A_D - A_0) + (1 - \sin \psi_0) \cdot \frac{\Delta Y_E}{r} \cdot \left(\frac{\Delta Y_E}{2r} \cdot \operatorname{tg} \gamma^0 + \cos \gamma^0 \right) \right]$;

$$\Delta Y_E = Y_E - Y_D = Y_E - r(1 - \cos \varphi_D);$$

$$\varphi_D = \pi/2 - \gamma^0;$$

$$\varphi_{GS} = \frac{-\theta - \sqrt{2} \cdot L_Y \cdot \cos \gamma^0 + \sqrt{(\theta + \sqrt{2} \cdot L_Y \cdot \cos \gamma^0)^2 + 2L_Y \cdot \cos^2 \gamma^0 \cdot \left(\frac{\theta}{\sin \varphi_0} - L_Y \right)}}{2(\theta - L_Y \cdot \sin \varphi_0)}$$

при $Y_E > Y_D$,

где $\theta = \sin \varphi_0 \cdot \left(\frac{\Delta Y_E}{r} + \varphi_D \cdot \cos \gamma^0 \right)^2$.

Восстановление царапины после снятия нагрузки

$$W_{YA} = \frac{r \cdot K_Y \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{\sqrt{3} \cdot E} \cdot f_{YA}, \quad (1)$$

где $f_{YA} = 2[1 - \sin \gamma^0 + (1 + 3/4 \cdot \pi + \gamma^0 - \varphi_{GS}) \cos \gamma^0]$; σ_T – предел текучести обрабатываемого материала; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости первого рода обрабатываемого материала; K_Y – коэффициент, учитывающий отличие механических свойств тонкого поверхностного слоя по сравнению с основной массой.

Математическое ожидание глубины внедрения абразивных зерен

$$E(Y_E) = \sigma[E(\gamma_0) - \gamma], \quad (2)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение режущего микрорельефа поверхности; γ – относительное сближение режущего микрорельефа с обрабатываемой поверхностью (см. рис. 2)

$$\gamma = y / \sigma,$$



$E(\gamma_0)$ – математическое ожидание относительных высот максимумов, функция которого от относительного сближения γ и параметров микрорельефа m и $n(0)$ приведена в работе [10]. После численного расчета это уравнение аппроксимировано в виде

$$E(\gamma_0) = \gamma^{0,802} + 0,97. \quad (3)$$

Для определения математического ожидания внедрения единичного зерна $E(y_E)$ воспользуемся зависимостями составляющих сил резания для единичного зерна по данным работы [10].

Нормальная P_y^1 и тангенциальная P_z^1 составляющие силы резания на единичном зерне определяются по выражениям:

$$P_y^1 = K \cdot r^2 \cdot f_y; \quad P_z^1 = K \cdot r^2 \cdot f_z,$$

где K – предел текучести на сдвиг; r – математическое ожидание радиуса средней приведенной кривизны всех вершин, рассчитывающееся в свою очередь как

$$r = \frac{3\sqrt{\pi}}{16\pi^2 \cdot m \cdot n(0) \cdot \sigma}; \quad (4)$$

f_y и f_z – безразмерные коэффициенты сил, формулы для расчета которых приведены в работе [10] в аппроксимированном виде:

$$f_y = 14,387 \cdot \varepsilon_E^{0,895}; \quad f_z = 7,1 \cdot \varepsilon_E; \quad (5)$$

где ε_E – относительная величина внедрения зерен, найденная из уравнения:

$$\varepsilon_E = E(y_E)/r. \quad (6)$$

Суммарные составляющие силы резания на всей площадке контакта равны:

$$P_y = K \cdot r^2 \cdot f_y \cdot E(N); \quad P_z = K \cdot r^2 \cdot f_z \cdot E(N), \quad (7)$$

где $E(N)$ – математическое ожидание количества зерен контакта на площади 1 мм^2 :

$$E(N) = \frac{\pi \cdot n^2(0)}{2\sqrt{2\pi}} \cdot \gamma \cdot e^{-\left(\frac{\gamma^2}{2}\right)}. \quad (8)$$

Подставив (2), (3), (5), (6) и (8) в уравнение (7) и решив относительно γ , получим

$$(\gamma^{0,802} - \gamma + 0,97)^{0,895} \cdot \gamma \cdot e^{-\left(\frac{\gamma^2}{2}\right)} = \frac{P_Y}{9,0149 \cdot K \cdot r^2 \cdot \left(\frac{\sigma}{r}\right)^{0,895} \cdot n^2(0) \cdot B \cdot L}, \quad (9)$$

где P_Y – полная нормальная составляющая силы для $B = 1 \text{ мм}$ (см. табл. 6–10).

Измерение нормальной составляющей силы резания производилось на образце из высокопрочного алюминиевого сплава В95пчТ2 размерами $100 \times 20 \times 3 \text{ мм}$. при обработке на



вертикально-фрезерном станке марки Deckel Maho DMC 635V. Основным элементом измерительной системы являлся трехкомпонентный динамометр фирмы Kistler (Швейцария), модель 9257B.

Определение величины γ по (9) возможно только при решении численным методом. На рис. 4 приведена зависимость γ от A – правой части уравнения (9), которая аппроксимирована уравнением:

$$\gamma = 2,5A^{-0,0531} \cdot e^{-2,929 \cdot A}.$$

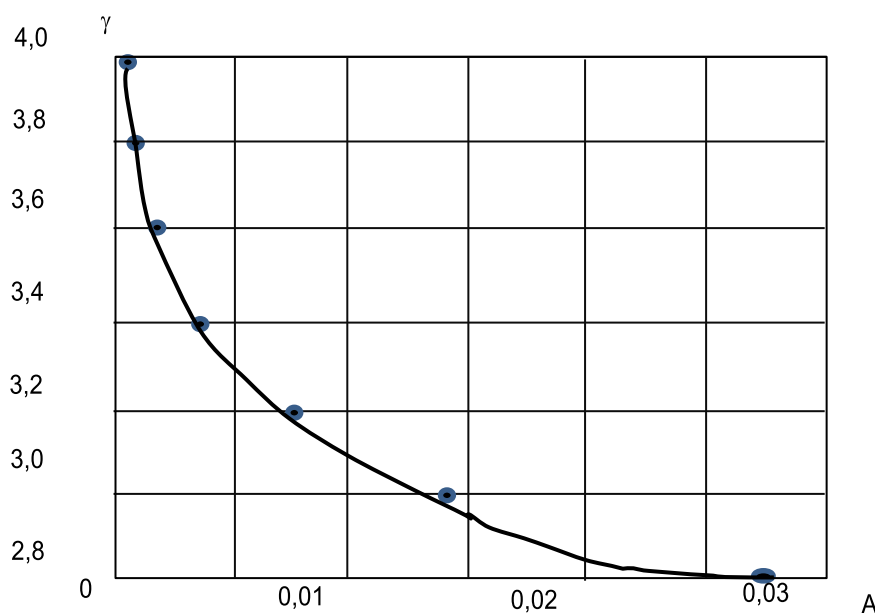


Рис. 4. Графическое представление уравнения (15)
Fig. 4. Graphical representation of the equation (15)

В уравнении (4) приведено среднее значение радиуса кривизны вершин на всем режущем микрорельефе. Исследования показали, что при обработке эластичным инструментом в процессе резания участвуют вершины зерен при очень малой глубине внедрения $E(y_E)$. Поэтому реальный радиус зависит от режимов обработки: скорости резания V , м/с; деформации круга Δy , мм; подачи S , мм/мин. По результатам исследования установлена зависимость радиуса кривизны вершин зерен от V , Δy и S . Названных параметров:

$$r = d_1 \cdot \Delta y^2 + d_2 \cdot V^2 + d_3 \cdot S^2 + d_4 \cdot \Delta y + d_5 \cdot V + d_6 \cdot S + d_7 \cdot \Delta y \cdot V + d_8 \cdot \Delta y \cdot S + d_9 \cdot V \cdot S + d_{10} \cdot \Delta y \cdot V \cdot S + d_{11}. \quad (10)$$

Значения коэффициентов d_{1-10} и свободного члена d_{11} в данном уравнении приведены в табл. 3.

Тонкий поверхностный слой обрабатываемой поверхности по своим механическим свойствам существенно отличается от основного материала. его поверхность несет на себе сложную систему адсорбционных слоев. А.С. Ахматов приводит следующую схему их расположения, начиная от первичной объемной структуры металла: зона деформированного металла, слой окислов металла, адсорбционный слой газов, адсорбционный слой воды, адсорбционный слой полярных молекул органического вещества (смазки) [14].



Таблица 3

Значения коэффициентов и свободного члена в (10)

Table 3

Values of the coefficients and the free term in (10)

Коэффициент / Coefficient	Марка круга / Wheel brand				
	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
d_1	$6 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
d_2	0	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0	0
d_3	$-1,4 \cdot 10^{-8}$	$-1 \cdot 10^{-9}$	0	$-1 \cdot 10^{-8}$	$-2,5 \cdot 10^{-9}$
d_4	$4 \cdot 10^{-3}$	-0,0145	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$
d_5	0	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
d_6	$-1,5 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-8}$	0	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-8}$
d_8	$5 \cdot 10^{-7}$	$-5 \cdot 10^{-6}$	0	$5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
d_9	0	$4 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
d_{10}	0	$1 \cdot 10^{-9}$	0	0	0
d_{11}	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,015	$2 \cdot 10^{-4}$	$-1,3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Не учитывать рассмотренную особенность приповерхностного слоя и его роль в процессе взаимодействия зерна с обрабатываемой поверхностью нельзя.

Для тонких финишных процессов обработки, каким является обработка эластичным абразивным инструментом, целесообразно воспользоваться условием пластичности Губера – Мизеса – $K = \sigma_T / \sqrt{3}$, сэкспериментальным поправочным коэффициентом K_y , учитывающим глубину внедрения абразивных зерен в обрабатываемый материал, наплыв материала и упругое его восстановление, введенными в уравнение (1) [13].

Поскольку глубина внедрения зерен зависит от скорости резания V и деформации эластичного инструмента Δy , то коэффициент K_y можно определить по формуле

$$K_y = (d_1 \cdot V^2 + d_2 \cdot V + d_3) \cdot (d_4 \cdot \Delta y^3 + d_5 \cdot \Delta y^2 + d_6 \cdot \Delta y + d_7). \quad (11)$$

В уравнении (11) Δy выражается в мм, V – в м/мин, а значения коэффициентов и свободных членов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов и свободного члена в (11)

Table 4

Values of the coefficients and the free term in (11)

Коэффициент / Coefficient	Марка круга / Wheel brand				
	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	FS-WL 2S CRS	DB-WL 8S MED	CF-FB 0,5A FIN
d_1	$-3,533 \cdot 10^{-6}$	$1,328 \cdot 10^{-5}$	$-8,445 \cdot 10^{-6}$	$1,144 \cdot 10^{-6}$	$3,76 \cdot 10^{-6}$
d_2	$-1,875 \cdot 10^{-3}$	-0,0521	-0,0247	$-9,887 \cdot 10^{-3}$	$-5,762 \cdot 10^{-3}$
d_3	19,616	45,699	45,927	18,464	275,121
d_4	-0,24	-0,4572	-0,075	-10,352	-0,05867
d_5	1,412	1,1165	0,982	47,516	0,856
d_6	-3,236	-0,148	-4,422	-71,246	-4,48533
d_7	3,487	0,253	7,085	35,896	9



Экспериментальное исследование шероховатости

Эксперименты по установлению зависимостей параметров шероховатости от режимов обработки проводились на образцах из сплава В95пчТ2 размером 3×20×100 мм на универсально-фрезерном станке модели 675. Продольная и поперечная шероховатость по параметру R_a измерялась на профилометре модели 283 завода «Калибр».

На рис. 5–7 приведены результаты исследования поперечной шероховатости.

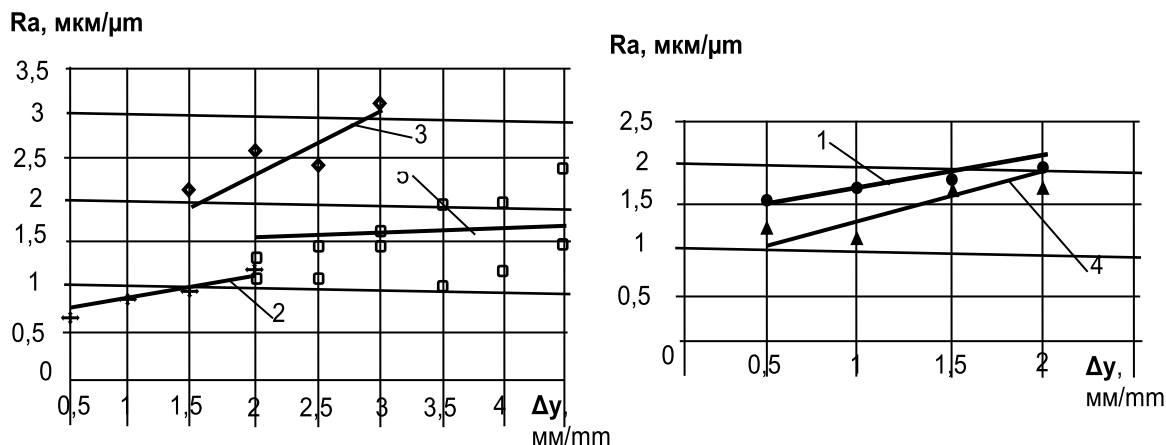


Рис. 5. Зависимость параметра шероховатости R_a от деформации Δy при $S = 130$ мм/мин для кругов:
1 – FS-WL 8A MED при $V = 441,4$ м/мин; 2 – FS-WL 6S FIN при $V = 406,8$ м/мин; 3 – FS-WL 2S CRS при $V = 464,4$ м/мин; 4 – DB-WL 8S MED при $V = 464,3$ м/мин; 5 – CF-FB 0,5A FIN при $V = 606,3$ м/мин.
Fig. 5. Dependence of the roughness parameter R_a on the deformation Δy at $S = 130$ mm/min for the wheels:
1 – FS-WL 8A MED at $V = 441.4$ m / min; 2 – FS-WL 6S FIN at $V = 406.8$ m / min; 3 – FS-WL 2S CRS at $V = 464.4$ m / min; 4 – DB-WL 8S MED at $V = 464.3$ m / min; 5 – CF-FB 0.5A FIN at $V = 606.3$ m / min

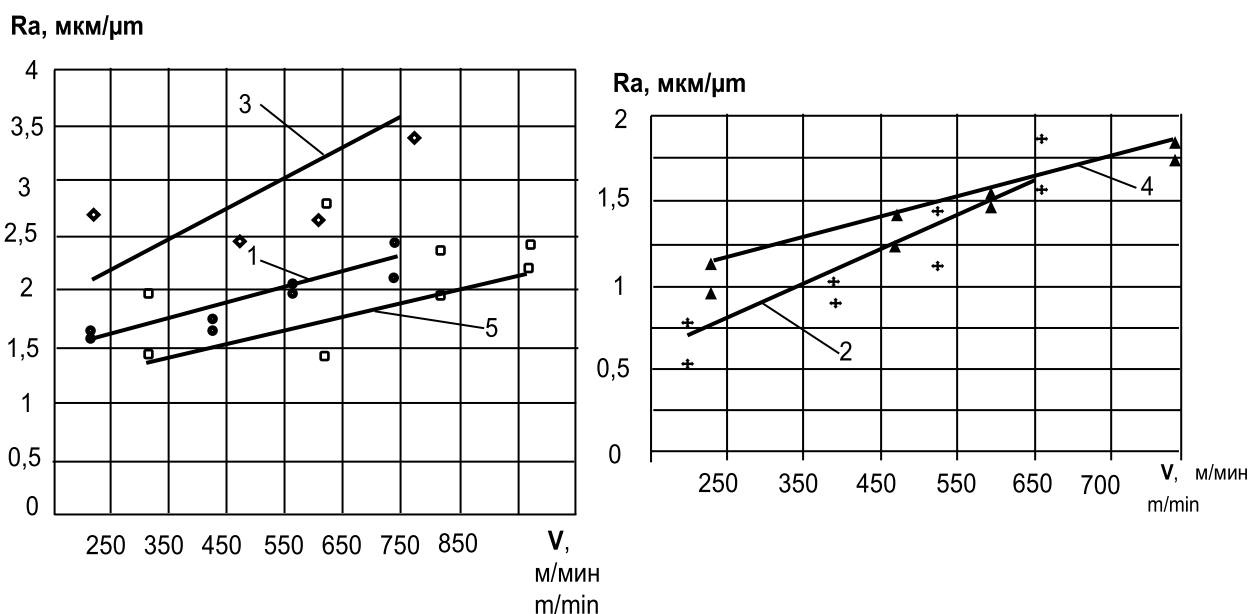


Рис. 6. Зависимость параметра шероховатости R_a от скорости резания V при подаче $S = 130$ мм/мин для кругов:
1 – FS-WL 8A MED при $\Delta y = 1,5$ мм; 2 – FS-WL 6S FIN при $\Delta y = 1,5$ мм; 3 – FS-WL 2S CRS при $\Delta y = 2,5$ мм; 4 – DB-WL 8S MED при $\Delta y = 1,5$ мм; 5 – CF-FB 0,5A FIN при $\Delta y = 4$ мм
Fig. 6. Dependence of the roughness parameter R_a on the cutting speed V at the feed $S = 130$ mm/min for the wheels:
1 – FS-WL 8A MED at $\Delta y = 1.5$ mm; 2 – FS-WL 6S FIN at $\Delta y = 1.5$ mm; 3 – FS-WL 2S CRS at $\Delta y = 2.5$ mm; 4 – DB-WL 8S MED at $\Delta y = 1.5$ mm; 5 – CF-FB 0.5A FIN at $\Delta y = 4$ mm

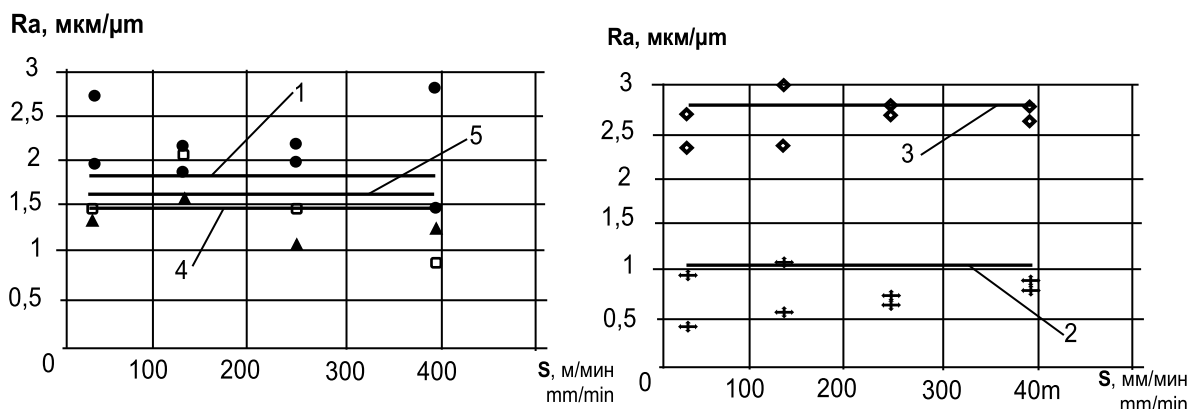


Рис. 7. Зависимость параметра шероховатости R_a от продольной подачи S для кругов:
1 – FS-WL 8A MED при $V = 441,4$ м/мин, $\Delta y = 1,5$ мм; 2 – FS-WL 6S FIN при $V = 406,8$ м/мин, $\Delta y = 1,5$ мм;
3 – FS-WL 2S CRS при $V = 457,9$ м/мин, $\Delta y = 2,5$ мм; 4 – DB-WL 8S MED при $V = 464,3$ м/мин, $\Delta y = 1,5$ мм;
5 – CF-FB 0,5A FIN при $V = 606,3$ м/мин, $\Delta y = 4$ мм

Fig. 7. Dependence of the roughness parameter R_a on the longitudinal feed S for the wheels: 1 – FS-WL 8A MED at $V = 441.4$ m/min, $\Delta y = 1.5$ mm; 2 – FS-WL 6S FIN at $V = 406.8$ m/min, $\Delta y = 1.5$ mm;
3 – FS-WL 2S CRS at $V = 457.9$ m/min, $\Delta y = 2.5$ mm; 4 – DB-WL 8S MED at $V = 464.3$ m/min, $\Delta y = 1.5$ mm;
5 – CF-FB 0.5A FIN at $V = 606.3$ m/min, $\Delta y = 4$ mm

Установлено, что поперечная шероховатость с увеличением деформации растет. Это объясняется тем, что с увеличением деформации растет вертикальная составляющая силы, и, следовательно, увеличивается и глубина внедрения единичных зерен в обрабатываемый материал.

С увеличением скорости резания поперечная шероховатость также растет. Это объясняется тем, что с увеличением скорости растет центробежная составляющая силы удара абразивного зерна по обрабатываемой поверхности.

От продольной подачи поперечная шероховатость не зависит. Это хорошо видно на рис. 7 и подтверждено дисперсионным анализом по [15].

Полученные экспериментальные зависимости достижимой поперечной шероховатости были аппроксимированы формулой вида:

$$R_a = \epsilon_1 \cdot \Delta y^2 + \epsilon_2 \cdot V^2 + \epsilon_3 \cdot \Delta y + \epsilon_4 \cdot V + \epsilon_5 \cdot \Delta y \cdot V + \epsilon_6, \quad (12)$$

где V – скорость резания, м/мин; Δy – деформация круга, мм.

Значения коэффициентов ϵ_1 – ϵ_5 и свободных членов ϵ_6 уравнения (12) приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения коэффициентов и свободных членов в уравнении (12)

Table 5

Values of the coefficients and free terms in the equation (12)

Коэффициент / Coefficient	Марка круга / Wheel brand				
	FS-WL 8A MED	FS-WL 6S FIN	CF-FB 0,5A FIN	DB-WL 8S MED	FS-WL 2S CRS
ϵ_1	0,05326541	$2,89829 \cdot 10^{-3}$	$6,66667 \cdot 10^{-3}$	0,10613115	0,098297
ϵ_2	$1,132 \cdot 10^{-6}$	$9,90857 \cdot 10^{-7}$	$6,66667 \cdot 10^{-7}$	$-1,55615 \cdot 10^{-7}$	$6,746 \cdot 10^{-7}$
ϵ_3	0,03116126	$6,12533 \cdot 10^{-6}$	0,01968	0,06468923	0,0131788
ϵ_4	$-1,2031 \cdot 10^{-4}$	$3,8861 \cdot 10^{-4}$	$7,31743 \cdot 10^{-5}$	$9,905 \cdot 10^{-4}$	$6,061 \cdot 10^{-4}$
ϵ_5	$4,9298 \cdot 10^{-4}$	$4,53183 \cdot 10^{-4}$	$2,79289 \cdot 10^{-5}$	$2,3847 \cdot 10^{-4}$	$5,708 \cdot 10^{-4}$
ϵ_6	1,20114	0,45	1,11	0,6	1,02427



Проведена проверка соответствия теоретически рассчитанных значений поперечной шероховатости экспериментальным данным при изменении деформации круга Δy и скорости резания V . В табл. 6–10 представлены экспериментальные ($Ra_{\text{Э}}$) и расчетные (Ra_T) значения.

Таблица 6

Результаты расчета шероховатости для круга FS-WL 8A MED

Table 6

Results of roughness calculation for the wheel FS-WL 8A MED

V , м/мин / m/min	S , мм/мин / mm/min	Δy , мм / mm	P_y , Н / Н	$Ra_{\text{Э}}$, мкм / μm	Ra_T , мкм / μm
220,7	130	1,5	2,253	1,56	1,56
441,4			2,226	1,86	1,862
551,7			2,208	2,05	2,054
706,2			2,178	2,37	2,369
441,4	130	0,5	0,225	1,51	1,512
		1,0	0,975	1,67	1,675
		1,5	2,226	1,86	1,862
		2,0	3,976	2,08	2,085

Таблица 7

Результаты расчета шероховатости для круга FS-WL 6S FIN

Table 7

Results of roughness calculation for the wheel FS-WL 6S FIN

V , м/мин / m/min	S , мм/мин / mm/min	Δy , мм / mm	P_y , Н / Н	$Ra_{\text{Э}}$, мкм / μm	Ra_T , мкм / μm
203,4	130	1,5	3,101	0,715	0,717
406,8			3,084	1,055	1,056
508,5			3,074	1,256	1,223
650,9			3,058	1,572	1,571
406,8	130	0,5	0,686	0,865	0,874
		1,0	1,599	0,959	0,965
		1,5	3,084	1,055	1,056
		2,0	5,144	1,152	1,144

Таблица 8

Результаты расчета шероховатости для круга FS-WL 2S CRS

Table 8

Results of roughness calculation for the wheel FS-WL 2S CRS

V , м/мин / m/min	S , мм/мин / mm/min	Δy , мм / mm	P_y , Н / Н	$Ra_{\text{Э}}$, мкм / μm	Ra_T , мкм / μm
231,2	130	2,5	2,22	2,178	2,212
464,4			2,151	2,756	2,782
578,1			2,051	3,072	3,075
739,9			1,841	3,545	3,559
464,4	130	1,5	0,944	2,086	2,081
		2,0	1,621	2,396	2,401
		2,5	2,151	2,756	2,782
		3,0	2,532	3,165	3,242



Таблица 9

Результаты расчета шероховатости для круга DB-WL 8S MED

Table 9

Results of roughness calculation for the wheel DB-WL 8S MED

V , м/мин / m/min	S , мм/мин / mm/min	Δy , мм / mm	P_y , Н / Н	Ra_{Σ} , мкм / μm	Ra_T , мкм / μm
232,2	130	1,5	2,62	1,239	1,238
464,3			2,489	1,526	1,526
580,4			2,419	1,663	1,663
742,9			2,318	1,848	1,849
464,4	130	0,5	0,266	1,139	1,139
		1,0	0,99	1,306	1,306
		1,5	2,489	1,526	1,526
		2,0	4,434	1,799	1,797

Таблица 10

Результаты расчета шероховатости для круга CF-FB-0,5AFIN

Table 10

Results of roughness calculation for the wheel CF-FB-0,5AFIN

V , м/мин / m/min	S , мм/мин / mm/min	Δy , мм / mm	P_y , Н / Н	Ra_{Σ} , мкм / μm	Ra_T , мкм / μm
303,2	130	4	1,178	1,382	1,385
606,3			1,27	1,622	1,624
757,9			1,337	1,788	1,793
970,1			1,454	2,071	2,073
606,3	130	3	0,755	1,546	1,548
		3,5	1,00	1,582	1,585
		4,0	1,27	1,622	1,624
		4,5	1,565	1,665	1,669

По данным, приведенным в табл. 6–10, видно, что математическая модель формирования шероховатости обработанной поверхности полностью коррелирует с экспериментальными данными.

Исследования достижимой продольной шероховатости показали, что $Ra_{\text{прод}}$ для всех примененных кругов не зависит от заданных режимов резания. Статистической обработкой результатов экспериментов доказано, что при уровне значимости $p=0,95$ по критерию Фишера влияние Δy , V и S на $Ra_{\text{прод}}$ является незначимым, значение достижимой продольной шероховатости зависит только от характеристик круга (зернистость, жесткость и т.д.)

После исключения грубых промахов во всей совокупности экспериментальных данных, которые составляли от 48 до 72 измерений, с использованием квантилей Стьюдента определены доверительные границы достижимой $Ra_{\text{прод}}$. В табл. 11 приведены эти границы, а также предельные экспериментальные значения.



Таблица 11

**Доверительные границы достижимой $Ra_{\text{прод.}}$
и предельные экспериментальные значения**

Table 11

Confidence boundary of the achievable $Ra_{\text{longitudinal}}$ and experimental limit values

Круг / Wheel	$Ra_{\text{прод.}} / Ra_{\text{longitudinal}}$	$Ra_{\text{(max)}}$	$Ra_{\text{(min)}}$
FS-WL-8AMED	$0,02 \leq M (Ra_{\text{прод.}} / longitudinal) \leq 0,478$	0,49	0,06
FS-WL-6SFIN	$0,018 \leq M (Ra_{\text{прод.}} / longitudinal) \leq 0,508$	0,59	0,07
FS-WL-2SCRS	$0,124 \leq M (Ra_{\text{прод.}} / longitudinal) \leq 0,68$	0,7	0,17
DB-WL-8SMED	$0 \leq M (Ra_{\text{прод.}} / longitudinal) \leq 0,49$	0,47	0,06
CF-FB-0,5AFIN	$0,184 \leq M (Ra_{\text{прод.}} / longitudinal) \leq 0,722$	0,69	0,22

Заключение

Разработанная теория формирования микрогеометрии поверхности детали, основанная на взаимодействии режущего микрорельефа эластичного абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, позволяет аналитически определить шероховатость по известным параметрам инструмента в зависимости от режимов обработки. При оптимизации технологического процесса данная математическая модель может быть использована как ограничительная функция для достижения заданного критерия оптимизации, например, целевой экономической функции.

Зависимость (11) параметра Ra от режимов обработки, построенная на экспериментальных данных, позволяет в производственных условиях легко определить ожидаемую шероховатость при разработке технологического процесса изготовления детали.

Если в технической документации на изделие есть ограничения по продольной шероховатости, то, пользуясь табл. 11, можно выбрать марку круга для обеспечения требуемой продольной шероховатости.

Библиографический список

1. Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М. Эффективная эксплуатация полимерно-абразивной щетки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2016. Вып. 73. С. 59–62.
2. Абрашевич Ю.Д., Оглоблинский В.А., Оглоблинский А.В. Щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных // Мир техники и технологий. 2006. № 5. С. 50–52.
3. Чапышев А.П., Иванова А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 1 (5). С. 1627–1634.
4. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 6 (2). С. 533–537.
5. Пини Б.Е., Яковлев Д.Р. О некоторых технологических возможностях щеток с абразивно-полимерным волокном // Известия МГТУ «МАМИ». 2009. № 1 (7). С. 148–151.



6. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава BT8-M // *Нові матеріали і тех-нології в металургії та машинобудуванні*. 2012. № 2. С. 87–90.
7. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимераабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2006. № 33. С. 106–108.
8. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Технологические возможности шлифования нолимер-абразивными кругами // *Научно-технические проблемы станкостроения, производства технологической оснастки и инструмента: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Одесса)*. Киев: АТМ, 2002. С. 102–104.
9. Дядя С.И., Гончар Н.В., Степанов Д.Н., Черный В.И., Алексеенко О.В. Обоснование выбора полимерно-абразивного инструмента для выполнения отделочных операций // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2010. № 2. С. 145–148.
10. Димов Ю.В. Обработка деталей свободным абразивом. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. 293 с.
11. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.
12. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование свойств эластичных абразивных кругов // *СТИН*. 2017. № 2. С. 27–32.
13. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
14. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
15. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. 288 с.

References

1. Abrashkevich Yu.D., Machishin G.M. Effective use of the polymer abrasive brush. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University], 2016, issue 73, pp. 59–62.
2. Abrashevich Yu.D. Ogloblinskii V.A. Ogloblinskii A.V. Brush tools on the basis of polymeric and abrasive ones. *Mir tekhniki i tekhnologii* [World of engineering and technology], 2006, no. 5, pp. 50–52. (In Russian).
3. Chapyshev A.P., Ivanova A.V. Technological capabilities of processes of mechanized finishing processing of the details with the use of automatic stationary units. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2014, vol. 16, no. 1 (5), pp. 1627–1634. (In Russian).
4. Chapyshev A.P., Ivanova A.V., Kryuchkin A.V. Technological capabilities of processes of details mechanized finishing processing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6 (2), pp. 533–537. (In Russian).
5. Pini B.E., Yakovlev D.R. Manufacturing capabilities of brushes with abrasive polymeric fibers. *Izvestiya MGTU "MAMI"* [Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"]], 2009, no. 1 (7), pp. 148–151. (In Russian).
6. Stepanov D.N. Influence of polymer-abrasive tool parameters and method of processing on the roughness of titanium alloy BT8-M. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta ma-shinobuduvanni* [New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering], 2012, no. 2, pp. 87–90.
7. Provolotskii A.E., Negrub S.L. Using polymer-abrasive elastic tools for finishing operations. *Vestnik khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University], 2006, no. 33, pp. 106–108.
8. Provolotsky A.E., Negrub S.L. Technological capabilities of grinding using polymer-abrasive wheels // *Scientific and technical problems of machine-tool construction, technological equipment and tools production: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Odessa, Kiev: ATM of Ukraine, 2002. Page 102–104.
9. Dyadya S.I., Gonchar N.V., Stepanov D.N., Chernyi V.I., Alekseenko O.V. Validation of the polymer-abrasive fibers selection for finishing operations procession. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni* [New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering], 2010, no. 2, pp. 145–148.
10. Dimov Yu.V. *Obrabotka detalei svobodnym abrazivom* [Part machining with loose abrasive]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2000, 293 p. (In Russian).
11. Rudzit Ya.A. *Mikrogeometriya i kontaktное vzaimodeistvie poverkhnostei* [Microgeometry and contact interaction of surfaces] Riga: Zinatne Publ., 1975, 210 p.
12. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Research of elastic abrasive wheel properties. *STIN* [STIN], 2017, no. 2, pp. 27–32. (In Russian).
13. Tomlenov A.D. *Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov* [Theory of plastic deformation of metals]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1972, 408 p. (In Russian).
14. Akhmatov A.S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya* [Molecular physics of boundary friction]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1963, 472 p. (In Russian).
15. Pustyl'nik E.I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudenii* [Statistical methods of observation analysis and processing]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 288 p. (In Russian).



Критерии авторства

Димов Ю.В., Подашев Д.Б. разработали математическую модель формирования шероховатости обработанной поверхности для кругов компании 3M марок Scotch-Brite™ FS-WL, DB-WL, CF-FB и подтвердили ее адекватность экспериментальными данными, провели обобщение и написали рукопись. Димов Ю.В. несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Dimov Yu.V., Podashev D.B. have developed a mathematical model of machined surface roughness formation for the wheels of the company 3M of brands Scotch-Brite™ FS-WL, DB-WL, CF-FB; proved its adequacy by experimental data, summarized the material and prepared the manuscript. Dimov Yu.V. bears the 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.



Оригинальная статья / Original article
УДК 621.98.042
<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-26-33>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СРЕДНЕАРИФМЕТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДРОБЕУДАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

© В.П. Кольцов¹, Ле Чи Винь², Д.А. Стародубцева³

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

РЕЗЮМЕ. При формообразовании панелей и обшивок, а также операции упрочнения широко применяют дробеударную обработку. Как правило, дробеударной обработке предшествует операция фрезерования. Сформированная в результате последовательного выполнения этих операций шероховатость поверхности представляет собой сложную структуру, полученную вследствие суммирования исходного микрорельефа и отпечатков дробы различной глубины и хаотичного расположения по поверхности. Поскольку дробеударный процесс носит случайный характер, то и полученная в результате фрезерования и дробеударного воздействия шероховатость также имеет свойства случайного процесса. **ЦЕЛЬ.** Разработка математической модели зависимости среднеарифметического отклонения профиля шероховатости поверхности при дробеударной обработке. **МЕТОД.** Предложена методика расчета шероховатости поверхности после дробеударной обработки на основе анализа глубин отпечатков. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Анализ глубин и распределения отпечатков дробы на сформированной в результате комплексной обработки поверхности позволил установить факт смещения исходной средней плоскости профиля и построить математическую модель среднеарифметического отклонения профиля поверхности. Экспериментальная проверка адекватности модели подтвердила ее достаточную точность и установила обратно пропорциональную зависимость базовой площади от степени покрытия.

Ключевые слова: дробеударное формообразование, оптический метод трехмерного сканирования, шероховатость поверхности при дробеударной обработке, средняя плоскость профиля, среднеарифметическое отклонение профиля.

Информация о статье. Дата поступления 25 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 22 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Математическая модель формирования среднеарифметического отклонения профиля поверхности при дробеударной обработке // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. № 2. С. 26–33. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-26-33

MATHEMATICAL MODEL OF SURFACE PROFILE ARITHMETIC MEAN DEVIATION FORMATION AT SHOT PEEN FORMING

V.P. Koltsov, Le Tri Vinh, D.A. Starodubtseva

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

ABSTRACT. Shot peen forming (SPF) is used for forming panels and skins as well as for hardening. As a rule, shot peen forming is performed after milling. The surface roughness obtained as a result of sequential performance of these operations is a complex structure, a combination of an original microrelief and shot peening indentations of different depths and chaotic distribution along the surface. As far as shot peen forming is a random process, the surface roughness resulting from milling and shot-blasting is random too. The **PURPOSE** of the paper is development of a mathematical dependence model of arithmetic mean deviation of surface roughness profile under shot peen forming. **METHOD.** A technique is proposed for calculating surface roughness after shot peen forming based on the indentation depth analysis. **RESULTS.** The analysis of depths and distribution of shot peen indentations along the surface allowed to identify the shift of the original profile center plane and build a mathematical model of the arithmetic mean deviation of the profile

¹Кольцов Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: kolcov@istu.edu

Vladimir P. Koltsov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: kolcov@istu

²Ле Чи Винь, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: vinh_istu@mail.ru

Le Tri Vinh, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: vinh_istu@mail

³Стародубцева Дарья Александровна, магистрант, e-mail: d.star-irk@yandex.ru
Daria A. Starodubtseva, Master's degree student, e-mail: d.star-irk@yandex



surface. Experimental testing proved model validity and determined the inversely proportional dependency of the basic area on the coverage degree.

Keywords: shot peen forming (SPF), optical method of three-dimensional scanning, surface roughness under shot-blasting, average profile plane, arithmetic mean deviation of the profile

Article info. Received December 25, 2017; accepted January 22, 2018; available online February 27, 2018.

For citations: Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. Mathematical model of surface profile arithmetic mean deviation formation at shot peen forming. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 26–33. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-26-33

Введение

Для получения сложных криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок в самолетостроении, а также операций упрочнения широко применяется дробеударная обработка [1].

При воздействии потока дроби, на поверхности обрабатываемой детали от ударов дробинок формируется специфический профиль шероховатости поверхности, характеризующийся многочисленными отпечатками дроби различного диаметра и глубины [2–5]. При этом распределение отпечатков на обрабатываемой поверхности носит хаотичный (случайный) характер. Операцией, предшествующей дробеударной обработке, может быть механическая либо другой вид обработки, имеющий свои особенности и параметры шероховатости поверхности [6]. В результате на микрорельеф поверхности, образованный предшествующей операцией, накладываются следы дробеударной обработки, формируя при этом новый микрорельеф. Таким образом, на профиль (процесс), образованный, например, механической обработкой, который носит систематический (детерминированный) характер, накладывается случайный процесс в виде хаотично расположенных отпечатков дроби различной глубины. Фактическое суммирование этих процессов образует новый микрорельеф поверхности детали, также имеющий свойства случайного процесса. При этом глубина большей

части отпечатков от ударов дроби по величине заметно превышает уровень микрорельефов от предыдущей обработки. Наличие совокупности отпечатков, величина которых превышает исходный уровень микрорельефа поверхности, увеличивает значения показателей шероховатости поверхности детали, что вызывает смещение средней линии профиля шероховатости поверхности.

При измерении параметров шероховатости трехмерной топографии поверхности, имеющей свойства случайного процесса, возникает необходимость определения базовой площади участка поверхности, гарантирующего получение достоверных результатов [7]. Поэтому величина базовой площади участка должна зависеть от плотности случайных выбросов. В дробеударной обработке таким параметром, характеризующим плотность выбросов, является степень покрытия (суммарное отношение площади отпечатков дроби на исследуемом участке ко всей площади данного участка).

Предыдущие исследования авторов работы [8] установили наличие зависимости площади базового участка от степени покрытия. Очевидно, что при определении шероховатости поверхности после дробеударной обработки становится актуальным и определение площади базовой поверхности для имеющейся степени покрытия.

Определение параметров шероховатости на базовой площади

Величина степени покрытия при дробеударной обработке теоретически может изменяться от 0 до 100%. Для операции дробеударного формообразования

(ДУФ) степень покрытия, как правило, лежит в пределах до 30%, а для упрочнения приближается к 100%. Не вызывает сомнений, что при любом значении степени по-



крытия процесс формирования шероховатости поверхности после дробеударной обработки носит случайный характер. При этом на изменение величин параметров шероховатости оказывает существенное влияние количество и глубина отпечатков дроби на контролируемом участке поверхности. Измерение параметров шероховатости на площади менее базовой дает разброс получаемых значений в ту или иную сторону. При приближении площади контролируемого участка к базовой показатели шероховатости стабилизируются по величине и при дальнейшем увеличении контролируемой площади становятся более постоянными.

На рис. 1 представлена схема условного профиля отпечатка дроби на предварительно фрезерованной поверхности.

На рис. 1 внесены следующие обозначения: R_s – диаметр дроби; h_i – глубина i -го отпечатка дроби от исходной средней плоскости P_0 ; h_i'' – расстояние от исходной средней плоскости P_0 до средней плоскости после дробеударной обработки P_i ; h_i' – глубина i -го отпечатка дроби до средней плоскости P_i ; r_i – радиус i -го отпечатка дроби в плане на исходной средней плоскости P_0 ; r_i' – радиус i -го отпечатка

дроби в плане на средней плоскости P_i ; V_i'' – объем усеченной части i -го отпечатка лунки между средними плоскостями P_0 и P_i ; V_i' – объем i -го отпечатка лунки под средней плоскостью P_i .

По определению базовая поверхность проводится относительно профиля поверхности детали и служит для оценки параметров шероховатости⁴. Очевидно и то, что она является частью номинальной поверхности детали, которая, в свою очередь, является поверхностью детали, заданной без учета допускаемых отклонений (неровностей).

Для определения параметров шероховатости по базовой площади поверхности необходимо нахождение средней плоскости P_i после дробеударной обработки. Согласно методам определения средней плоскости, при трехмерной топографии поверхности и определении параметров шероховатости деталей на базовой площади, [9] (где базовая площадь принимается в виде квадрата со стороной, равной базовой длине) средняя плоскость – это плоскость, объем материала над и объем пустот под которой в пределах данной базовой площади равны.

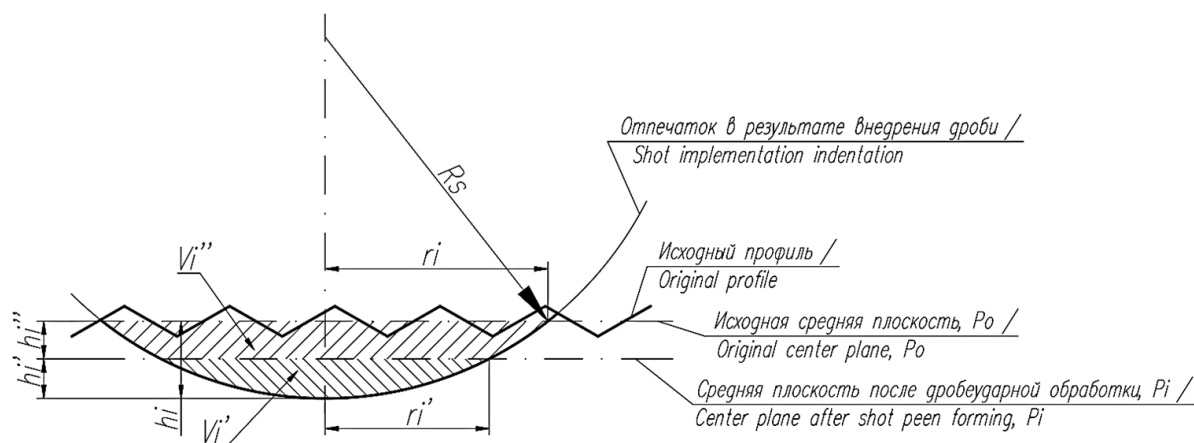


Рис. 1. Схема условного профиля отпечатка дроби
Fig. 1. Diagram of a conditional profile of shot peening indentation

⁴ГОСТ 25142-82 СТ СЭВ 1156-78. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Введен 1982-02-18. Москва: Изд-во стандартов, 1982. / GOST 25142-82 ST SEV 1156-78. Surface roughness. Terms and definitions. Moscow, Standards Publ., 1982.



Поскольку в результате дробеударного воздействия на поверхности детали образуются отпечатки, глубина большинства которых, как правило, превышает величину исходных микронеровностей поверхности предыдущей обработки, естественно предположить, что средняя плоскость после ДУФ должна находиться ниже исходной средней плоскости фрезерованной поверхности.

Если P_0 – средняя плоскость исходной фрезерованной поверхности до ДУФ, а шероховатость фрезерованной поверхности достаточно равномерна относительно своей средней плоскости, то условно можно считать, что под P_0 образуется сплошное тело, поскольку общий объем материала над P_0 компенсирует общий объем пустот под P_0 .

Назовем F_b базовой площадью, тогда общий объем материала относительно средней плоскости P_i определяется следующим образом:

$$\sum \text{объем пустот под } P_i = \sum \text{объем материала над } P_i, \quad (1)$$

то есть,

$$\sum_{i=1}^n V_i' = F_b \cdot h_i'' - \sum_{i=1}^n V_i'', \quad (2)$$

где F_b – базовая площадь измерения.

При этом

$$\sum_{i=1}^n V_i'' = \sum_{i=1}^n V_i - \sum_{i=1}^n V_i', \quad (3)$$

где V_i – общий объем лунки i -го отпечатка.

Тогда

$$\sum_{i=1}^n V_i' = F_b \cdot h_i'' - (\sum_{i=1}^n V_i - \sum_{i=1}^n V_i') \quad (4)$$

или

$$\sum_{i=1}^n V_i = F_b \cdot h_i''. \quad (5)$$

Расстояние h_i'' от исходной средней плоскости P_0 до средней плоскости после дробеударной обработки P_i определяется следующим образом:

$$h_i'' = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{F_b}. \quad (6)$$

Поскольку форма лунки отпечатка дробы близка к сферической [8], тогда объем каждого i -го отпечатка принимается как объем сегмента шара с высотой h_i соответственно:

$$h_i'' = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{F_b} = \frac{1}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n \pi \cdot h_i^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3}h_i\right), \quad (7)$$

где R_s – радиус дробы.

Как известно, среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой площади в общем виде можно определить по следующей формуле:

$$Sa = \frac{1}{F} \iint |\eta(x, y)| dx dy, \quad (8)$$

где Sa – среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой площади; F_b – базовая площадь; x, y – координаты на поверхности отчета; $\eta(x, y)$ – функция отклонения неровностей от средней плоскости, при этом (в данном случае) $\iint |\eta(x, y)| dx dy$ описывает общий объем материала над и пустот под средней плоскостью.

Шероховатость обработанной дробью поверхности детали носит неопределенный характер, поэтому трудно найти единую функцию отклонения неровностей от средней плоскости. В этом случае целесообразно разбить среднюю плоскость на m участков, на каждом из которых отклонение профиля поверхности подчиняется какой-то функции $F(u_j)$. Тогда объем материала j -го участка определяется зависимостью [9]:

$$V(u_j) = \int_0^u F(u_j) du_j, \quad (9)$$

где $V(u_j)$ – объем области, ограниченный полем $H(x, y)$ (поверхность) и плоскостью, параллельной координатной плоскости (x, y) на расстоянии u от нее.

Если взять найденную выше среднюю плоскость в качестве плоскости (x, y) ,



и u , изменяющуюся от 0 до $u_{\max}$ (максимальное значение каждого выступа или впадины профиля поверхности в пределах базовой площади), то общий объем материала или пустот над или под найденной средней плоскостью P_i определяется следующим видом:

$$\sum_{j=1}^m V(u_j) = \sum_{j=1}^m \int_0^u F(u_j) du_j, \quad (10)$$

где m – количество участков в пределах базовой площади.

Поскольку общий объем материала над средней плоскостью равен общему объему пустот под ней, то среднее арифметическое отклонение профиля от средней плоскости в пределах базовой площади можно описать следующей формулой:

$$Sa = \frac{1}{F} \iint |\eta(x, y)| dx dy = \frac{1}{F_b} \sum_{j=1}^m \int_0^u F(u_j) du_j = \frac{2}{F_b} \sum_{i=1}^n V'_i. \quad (11)$$

С учетом формулы (3) и формы лунки отпечатка дроби близкой к сферической,

получаем следующее:

$$Sa = \frac{2}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n V'_i = \frac{2}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n \pi \cdot (h'_i)^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} h'_i \right) = \frac{2\pi}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n (h_i - h''_i)^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} (h_i - h''_i) \right). \quad (12)$$

Полученная зависимость определяет величину Sa после ДУФ без учета исходной шероховатости поверхности. С учетом исходной шероховатости поверхности общее арифметическое отклонение профиля можно определить по формуле:

$$Sa_t = 0,5Sa_m + \frac{2\pi}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n (h_i - h''_i)^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} (h_i - h''_i) \right), \quad (13)$$

где Sa_m – среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой площади исходной поверхности.

Проверка адекватности предложенной модели шероховатости процесса

Для проверки адекватности математической модели по определению среднего арифметического отклонения профиля поверхности в пределах базовой площади были проведены измерения глубины отпечатков дроби на 4-х назначенных площадях участков размерностью 7x7, 10x10, 15x15 и 20x20 мм. Исследования выполняли при помощи оптического профиллометра модели Bruker Contour GT-K1, который по результатам сканирования контролируемой поверхности выдает ее цифровую модель, параметры шероховатости, микропрофиль в любом заданном продольном и поперечном сечении образца, а также позволяет выполнить точное измерение глубины каждого отпечатка.

Радиус каждого отпечатка в плане определяли с помощью программы AutoCAD.

Образец для исследований изготов-

лен из материала В95, обработан фрезерованием, а затем дробью диаметром 3,5 мм.

Измерения микрорельефа обработанной дробью поверхность были выполнены от одной точки с постепенным ростом длины и ширины сканированного участка от 7 до 20 мм.

На рис. 2 показан вид в плане сканированного образца 20x20 мм и его микропрофиль в заданных сечениях. Степень покрытия образца близка к 11%.

Из рис. 2 видно, что глубин отпечатков дроби существенно превышает величину микронеровностей исходной фрезерованной поверхности. Перекрывание отпечатков практически отсутствует. Наплыв материала вокруг отпечатков в результате пластической деформации, как правило, не превышает высоты неровностей исходной фрезерованной поверхности образца.

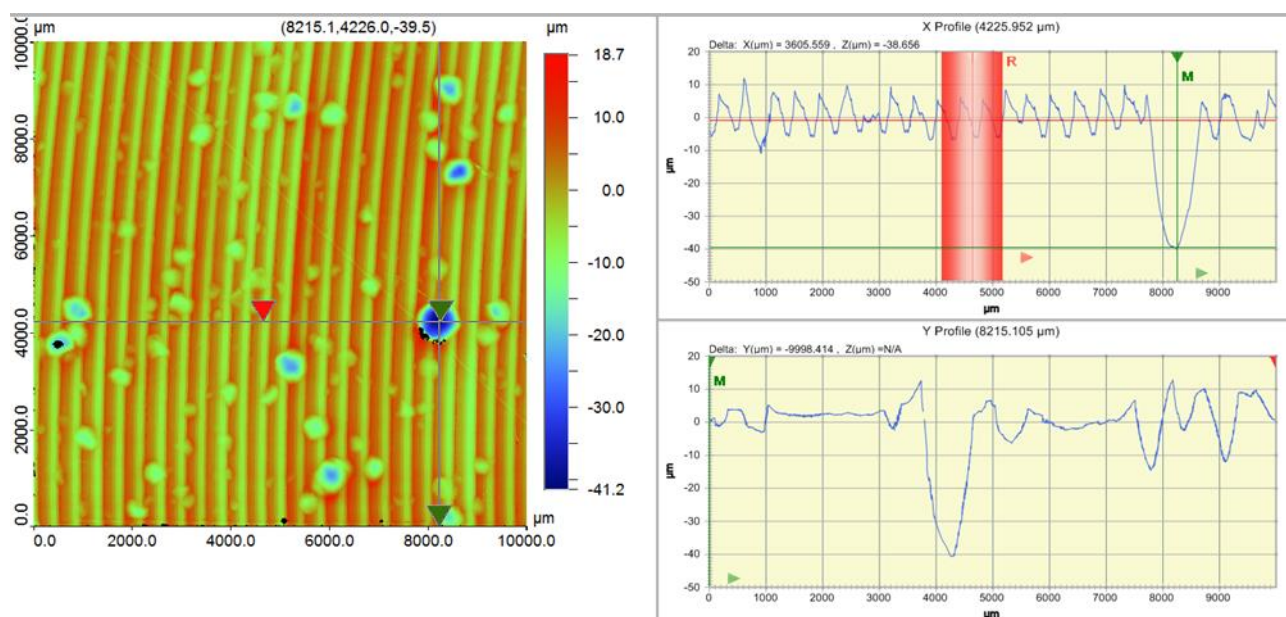


Рис. 2. Цифровая модель образца в плане (а) и профиль микрорельефа в нормальном сечении одного из наибольших отпечатков (б)
Fig. 2. Plan view of the digital model of a sample (a) and a microrelief profile in a normal section of one of the largest indentations (b)

Очевидно, что новый, после ДУФ микрорельеф поверхностного слоя образован за счет отпечатков дроби, поэтому их размеры и определяют параметры шероховатости поверхности.

По измеренным значениям глубины каждого отпечатка на каждом исследуемом участке поверхности по формуле (6) рассчитаны расстояния положения средней

плоскости P_i от исходной средней плоскости и определены средние арифметические отклонения Sa_i (13). Также проведены сравнения расчетных значений Sa_i для каждой сканированной площади с аналогичным значением, полученным на оптическом профилометре.

Результаты измерений и расчетов приведены в таблице.

Результаты измерений и расчетов Measurement and calculation results

Размер сканируемого участка, (мм x мм) / Size of the scanned area, (mmxmm)	Кол-во отпечатков, (шт.) / Number of indentations (units)	Исходное значение шероховатости Ra_m , (мкм) / Original roughness value (Ra_m , μm)	Среднее значение глубины отпечатков, (мкм) / Average value of indentation depth, (μm)	Расстояние h_i'' , (мкм) / Distance h_i'' , (μm)	Расчетное значение Sa_i , (мкм) / Target value Sa_i , (μm)	Измеренное среднее значение Ra на сканированной площади, (мкм) / Measured average value Ra along the scanned area, (μm)	Отклонение расчетного Sa_i от измеренного Ra (%), (Deviation of the target value Sa_i from the measured value Ra , (%))
7 x 7	39	0,40	13,9	1,96	3,69	2,88	21,9
10 x 10	57	0,41	17,8	1,65	3,15	2,704	14,1
15 x 15	120	0,406	18,3	1,70	3,25	2,743	15,6
20 x 20	189	0,402	18,8	1,62	3,14	2,884	8,1

Примечание. При расчетах Sa_i в качестве Sa_m принято значение исходного среднего Ra_m на всей сканированной площади. Так как для фрезерованной поверхности, благодаря однородности и равномерности ее микрорельефа, среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой длины на сканированной площади и базовой площади практически не отличается.



Из анализа данных таблицы следует, что на сканированной площади 7x7 мм шероховатость после обработки дробью значительно выше, чем на остальных площадях. Поскольку процесс формирования шероховатости при ДУФ является случайным, то с увеличением площади сканирования и приближением ее к базовой, он становится все более стационарным, что приводит к стабилизации значений шеро-

ховатости. В рассматриваемом случае при данной степени покрытия базовой площадью поверхности может считаться участок 15x15 мм. При увеличении размеров участка сканирования вероятное отклонение шероховатости будет изменяться в сторону уменьшения, но объем измерений редко возрастает вследствие большого количества отпечатков.

Выводы

Предложена математическая модель зависимости среднеарифметического отклонения профиля поверхности дробеударной обработки на основе анализа глубин отпечатков на базовой площади.

Размеры базовой площади для контроля параметров шероховатости при дробеударной обработке находятся в обратном пропорциональном соотношении от степени покрытия.

Библиографический список

1. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. 138 с.
2. Чапышев А.П. Статистическое описание поверхности после дробеударного формообразования // Перспективные технологии получения и обработки материалов: материалы региональной научно-технической конференции (г. Иркутск, 25–26 сентября 2004 г.). Иркутск, 2004. С. 42–46.
3. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Учет влияния структуры зоны обработки при дробеударном формообразовании // Технологическая механика материалов: межвузовский сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. С. 22–27.
4. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Лебский С.Л. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2005. № 3. С. 52–55.
5. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Чапышев А.П. К определению величины припуска при зачистке

- поверхности панелей и обшивок лепестковым кругом после дробеударного формообразования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 25–30.
6. Ivanova A., Belomestnyh A., Semenov E., Ponomarev B. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details // International Journal of Engineering and Technology. 2015. Т. 7. № 5. С. 1774–1780.
7. Порошин В.В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей. М.: Машиностроение-1, 2007. 196 с.
8. Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. К определению степени покрытия после дробеударной обработки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11 (130). С. 45–52.
9. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 344 с.

References

1. Pashkov A.E. *Tehnologicheskie svyazi v processe izgotovleniya dlinnomernykh listovykh detalej* [Technological relationships under long sheet metal part manufacturing]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2005, 138 p. (In Russian).
2. Chapyshev A.P. *Statisticheskoe opisanie poverhnosti posle drobeudarnogo formoobrazovaniya* [Statistical description of surface after shot peening]. *Materialy regional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Perspektivnye tehnologii polucheniya i obrabotki materialov"* [Proceedings of the regional scientific and technical conference "Promising technologies of materials manu-

- facturing and machining" (Irkutsk, 25–26 September 2004). Irkutsk, 2004, pp. 42–46. (In Russian).
3. Pashkov A.E., Chapyshev A.P. *Uchet vlijaniya struktury zony obrabotki pri drobeudarnom formoobrazovanii* [Accounting machining zone structure effect under shot peening forming]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnykh trudov "Tehnologicheskaja mehanika materialov"* [Interuniversity collection of scientific articles "Technological mechanics of materials"]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2003, pp. 22–27. (In Russian).
4. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Lebskij S.L. Predict-



ing parameters of machine part hardening by surface plastic deformation. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* [Izvestia VSTU], 2005, no. 3, pp. 52–55. (In Russian).

5. Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Chapyshev A.P. By definition, the value of the allowance during deburring abrasive mop panel surface after shot peen forming. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. A.N. Tupoleva* [Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev], 2017, vol. 73, no. 1, pp. 25–30. (In Russian).

6. Ivanova A., Belomestnyh A., Semenov E., Ponomarev B. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details. *International Journal of Engineering and Technology*. 2015, vol. 7, no. 5, pp. 1774–1780.

Критерии авторства

Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. 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.

7. Poroshin V.V. *Osnovy kompleksnogo kontrolja topografii poverhnosti detalej* [Fundamentals of complex part surface topography control: monograph]. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ., 2007, 196 p. (In Russian).

8. Koltsov B.P., Le Tri Vinh and Starodubtseva D.A. To the problem of shot peening coverage degree determination. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* [Irkutsk National Research Technical University], 2017, vol. 21, no. 11 (130), pp. 45–52. (In Russian).

9. Husu A.P., Vitenberg Ju.R., Pal'mov V.A. *Sherohovatost' poverhnostej: teoretiko-verojatnostnyj podhod* [Surface roughness: theoretical and probabilistic approach]. Moscow: Nauka Publ., 1975, 344 p. (In Russian).

Authorship criteria

Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.822+656.21

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-34-44>

МЕТОДИКА АГРЕГИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ СТАНЦИИ УЛАН-БАТОРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

© В.Л. Аршинский¹, Л.В. Аршинский², Хишигсүрэн Доржсүрэн³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

²Иркутский государственный университет путей сообщения,
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

³Институт транспорта,
Монголия, 210535, Улан-Батор, р-н Баянгол, 2-й квартал, пр-т Мира, 44.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Обсуждение методики оценки качества функционирования производственно-экономической системы на примере одной из станций Улан-Баторской железной дороги. **МЕТОДЫ.** В основе лежит разработка онтологической модели станции с последующим преобразованием ее в продукционную базу знаний специального типа. Каждая продукция имеет экспертно-задаваемую истинность по шкале [0,1], рассматриваемую как относительную ценность компонента системы. Процедура оценивания выглядит как диалог с экспертной системой, в которую вводятся оценки состояния функциональных элементов. Итогом является агрегированная оценка в виде числа из интервала [0,1], характеризующего меру истинности утверждения о функциональности системы. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результатом исследования служит методика агрегированного оценивания производственно-экономической системы, основанная на процедуре нечеткого логического вывода с применением технологии экспертных систем. **ВЫВОДЫ.** Методика может применяться для агрегирования оценивания в различных предметных областях.

Ключевые слова: агрегированное оценивание, производственно-экономическая система, железнодорожная станция, онтология, база знаний, экспертная система, нечеткий вывод.

Информация о статье. Дата поступления 23 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 22 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Аршинский В.Л., Аршинский Л.В., Доржсүрэн Хишигсүрэн. Методика агрегированной оценки состояния производственно-экономической системы на примере станции Улан-Баторской железной дороги // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 34–44. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-34-44

METHODS OF PRODUCTION-ECONOMIC SYSTEM AGGREGATE ASSESSMENT ON EXAMPLE OF ULAN BATOR RAILWAY STATION

Arshinsky V.L., Arshinsky L.V., Dorzhsuren Khishigsuren

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

Irkutsk State Transport University,

15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russian Federation

Transport Institute of Mongolia,

44 Peace Ave., 2nd quarter, Bayangol, Ulaanbaatar, Mongolia.

ABSTRACT. The **PURPOSE** of this work is to discuss the methods of production-economic system operation quality assessment on example of one of the stations of the Ulan Bator railway. **METHODS.** The methodology is based on the

¹Аршинский Вадим Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем, e-mail: arshinskyv@mail.ru

Vadim L. Arshinsky, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automated Systems, e-mail: arshinskyv@mail.ru

²Аршинский Леонид Вадимович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и защиты информации, e-mail: larsh@mail.ru

Leonid V. Arshinsky, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Systems and Information Security, e-mail: larsh@mail.ru

³Доржсүрэн Хишигсүрэн, преподаватель, e-mail: khishigsurenkhishgee238@gmail.com

Dorzhsuren Khishigsuren, Lecturer, e-mail: khishigsurenkhishgee238@gmail.com



developed ontology of the station transformed into a production knowledge base of a special type. Every product has truth value specified by experts on a scale [0,1]. It is considered as a relative value component of the system. The assessment procedure is represented in the form of a dialogue with the expert system into which functional element state estimations are introduced. As a result an aggregate assessment is derived in the form of a number within the interval [0,1] that measures the truth value of the assertion on system functionality. **RESULTS.** The study has resulted in the development of fuzzy inference-based aggregate estimation of a production and economic system involving the technology of expert systems. **CONCLUSIONS.** The methodology can be applied for estimation aggregation in various object domains.

Keywords: *aggregate estimation, production and economic system, railway station, ontology, knowledge base, expert system, fuzzy inference*

Article info. Received November 23, 2017; accepted January 22, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Arshinsky V.L., Arshinsky L.V., Dorzhsuren Khishigsuren. Methods of production-economic system aggregate assessment on example of Ulan Bator railway station. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 34–44. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-34-44

Введение

Принятие управленческих решений на основе количественных оценок результатов функционирования объектов – одна из основ управления. Это относится как к техническим объектам и системам, так и к производственно-экономическим, к числу которых могут быть отнесены объекты транспортной инфраструктуры. Транспортные системы любого государства – это сложные образования, включающие в себя производственные, технические, социальные, экономические и даже географические аспекты. Их протяженность, решаемые задачи, большое количество персонала, поддерживающего их функционирование, и многие другие факторы делают принятие решений по их управлению сложной задачей. Как отмечается в [1], уникальность транспортной отрасли заключается в том, что транспорт одновременно является движущей (в прямом и переносном смысле) силой экономики, а при определенных условиях может выступать в роли сдерживающего фактора ее развития. Это выводит задачу управления транспортной отраслью, в том числе железнодорожным транспортом, на такой же уровень значимости, как, например, управление финансовой, а в XXI веке информационной и образовательной системами государства. Разрушение или просто ущербное функционирование любой из этих систем ставит под угрозу само существование общества. В связи с этим резко возрастает значимость грамотных управленческих решений в сфере управления железнодорожным транспортом.

Объектами управления в сфере железнодорожного транспорта могут выступать как отдельные подразделения, звенья и элементы железнодорожного транспорта так и группы взаимосвязанных подразделений и элементов [2]. К числу таких звеньев и элементов, безусловно, относятся железнодорожные станции, эффективная работа которых вносит вклад в эффективную работу всей системы. Управление работой станции можно разбить на два уровня: управление со стороны вышестоящей структуры и оперативное управление непосредственной работой станции с целью обеспечения оптимального соблюдения значений показателей работы станции в любых режимах ее работы [3]. Учитывая, что станция как объект является сложной производственно-технологической подсистемой системы железнодорожного транспорта, включающей в себя множество взаимосвязанных частей, оценка ее работы должна состоять из оценок работы ее компонентов, к числу которых относятся как компоненты самой станции, так и, возможно, подчиненные инфраструктурные единицы: разъезды, обгонные пункты и т.п.

При этом система управления второго уровня обеспечивает эффективность функционирования компонентов станции, а система первого уровня оценивает работу станции в целом. Таким образом, методика оценивания работы станции должна включать агрегированную оценку станции как объекта управления и оценки эффективности функционирования ее составных частей (компонентов).

Железнодорожный транспорт как система подчинена двум целям: обеспечению пере-



возочного процесса и обеспечению рентабельности перевозок [2]. Однако рентабельность и связанный с ней показатель прибыльности – это укрупненные характеристики, которые не позволяют выявить вклады производственных компонентов системы: ее подсистем и функциональных элементов. Являясь по своему духу агрегированными показателями, они не структурированы в технологическом смысле. В них не видно участие отдельных составляющих: должностных лиц, служб, участков и т.п. С помощью таких показателей нет возможности анализировать эффективность функционирования компонентов, которые сами по себе не являются источником конечного продукта (а это едва ли не любая подсистема производственной системы). Для таких случаев обычно используются другие критерии. К примеру, рейтингование, как выставление неких условных безразмерных оценок отдельным компонентам (коллективам, цехам, участкам и т.п.), которые позволяют сравнить их в отношении лучше-хуже. Но качественный рейтинг немыслим без учета структурных особенностей оцениваемой системы. Понимание структуры позволяет уяснить место и роль компонентов системы, их важность, взаимосвязь и влияние друг на друга, вклады одних в функционирование других и т.п. Далее эта информация может быть превращена в базу знаний (БЗ) соответствующей экспертной системы (ЭС). Основой для разработки БЗ может служить соответствующая онтология [4, 5].

Онтологическое моделирование станции Амгалан

Станция Амгалан находится возле Улан-Батора и контролирует участок пути от 412 до 468 километров Улан-Баторской железной дороги. Участок включает такие пункты, как Амгалан, а также подчиненные станции: Туул, Хонхор, Бумбат, Баян, Хайрхан и Хоолт. Управляет работой основной станции начальник (НС), которому подчиняются дежурный по станции (ДС), приемосдатчик (ПС), товаро-багажный приемосдатчик (ТБПС) и заведующий билетной кассой (ЗБК). В свою очередь, дежурный по станции управляет работой второй группы специалистов и подчиненными станциями. Вторая группа: дежурный по парку (ДП), вагоноосмотрщик (ВО), главный кондуктор (ГК) и уборщицы (У) [6]. Их совместная работа определяет эффективность работы всего указанного участка.

Для понимания структуры производственно-технологических отношений на данном участке железной дороги построим онтологическую модель станции, включающую следующие концепты: подразделения и должностные лица, а также отношения включения и подчиненности (руководства) – графическое представление онтологии приведено на рис. 1. Для разработки концепт-карты использована инструментальная система CMapTools [7]. В соответствии с [6] на базе этой модели может быть разработана продукционная БЗ ЭС агрегированного оценивания.

Согласно построенной модели, работой всей системы руководит начальник станции. Он при этом управляет частью персонала, а также дежурным по станции, который, в свою очередь, управляет работой второй части персонала и подчиненными станциями. То есть ответственность за работу всего комплекса станций несет начальник станции, а ответственность за работу подчиненных станций помимо их руководства несет дежурный. В связи с этим эффективность работы дежурного должна оцениваться в том числе и по эффективности работы станций Туул, Хонхор и пр.

Руководитель станции – НС – оценивается по результатам работы всех составляющих.

Онтологические модели подчиненных станций

Онтологии для подчиненных станций идентичны друг другу и включают начальника станции (НС), дежурного по станции (ДС), механика по связи СЦБ (МС), механика по и электроснабжению (МЭ), бригадира путевой части (БПЧ), 2–3-х рабочих-путейцев (РП) и 1-го путейца по ремонту сетки (ПРС) (рис. 2).



Отличительной особенностью является руководство персоналом со стороны как начальника станции, так и дежурного. Это формирует определенную коллизию: результатом чьего руководства является эффективная работа персонала, – начальника станции или дежурного? Общее руководство осуществляет начальник, оперативное – дежурный. Исходим из того, что оба должностных лица несут солидарную ответственность, что необходимо отразить в расчетах. В то же время, НСт отвечает за функционирование всей станции в целом.

Эффективность работы всего комплекса станций может быть оценена на основе общей онтологии, включающей как саму станцию Амгалан, так и станции Туул, Хонхор, Бумбат, Баян, Хайрхан и Хоолт. Онтологии для каждой из этих станций одинаковы и представлены на рис. 2.

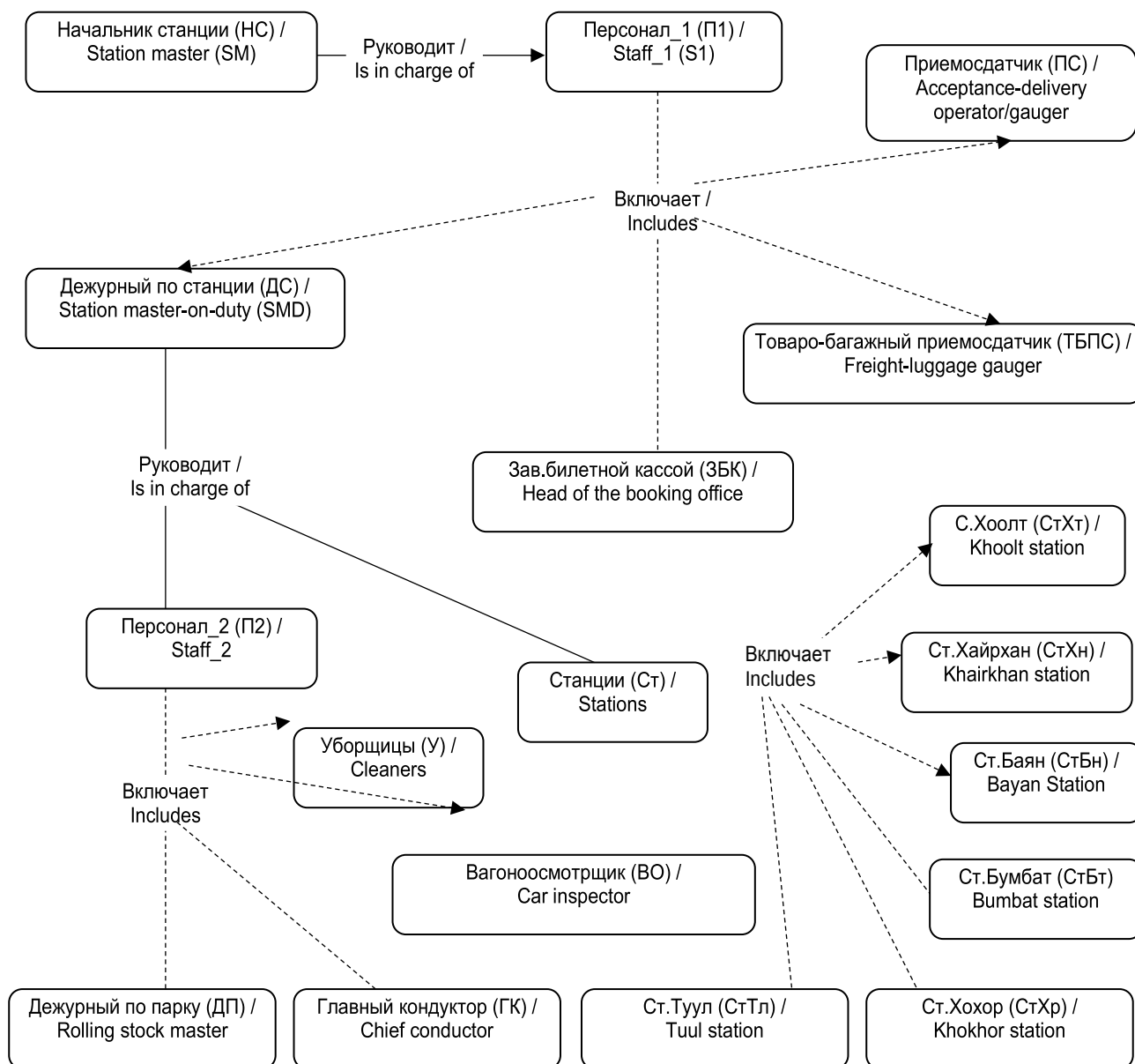


Рис. 1. Графическое представление онтологической модели станции Амгалан

Fig. 1. Graphical representation of the ontological model of Amgalan station

Полная онтологическая модель для станции Амгалан должна включать все онтологии для подчиненных станций. Однако это делает сеть внешне достаточно громоздкой и потому общую онтологию изобразим в условном виде, где онтологии для подчиненных станций будут представлены единой (общей для них) онтологией, соединенной с концептами-станциями



(рис. 3). Отношение «описывается как» подразумевает, что каждая станция описывается отдельным графом, подобным графу на рис. 2.

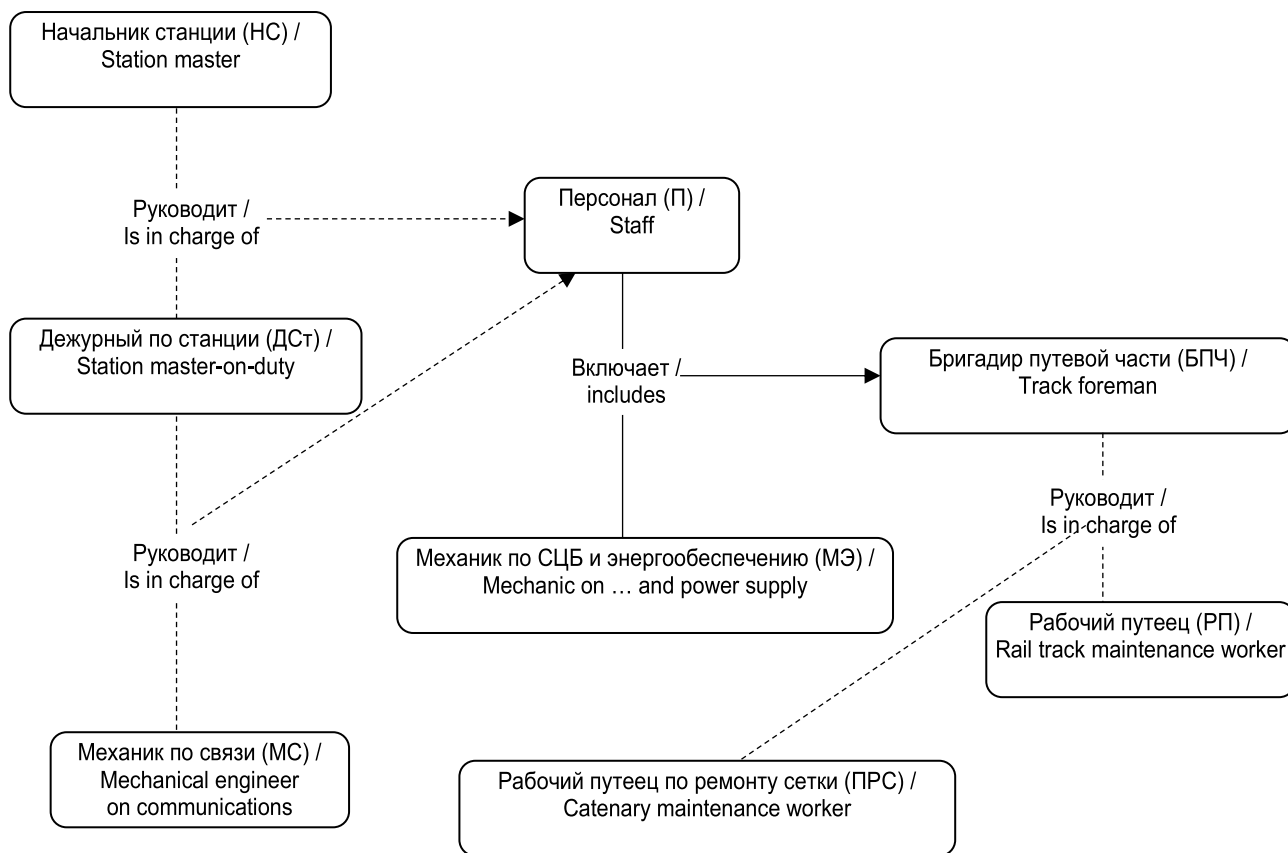


Рис. 2. Графическое представление онтологической модели подчиненных станций
Fig. 2. Graphical representation of the ontological model of secondary stations

Обобщенная онтология для станции Амгалан

При расчете агрегированных оценок это означает, что для каждой станции (Туул, Хонхор, Бумбат, Баян, Хайрхан и Хоолт) необходимо единообразно оценить ее работу. Оценки могут формироваться аудиторами, которые определяют состояние (эффективность работы) низовых звеньев (функциональных элементов), непосредственно обеспечивающих работу станции. Эффективность руководящего состава оценивается по результатам работы подчиненных им работников или служб. При этом на всех уровнях оценка службы или подразделения и оценка ее руководителя – одна и та же оценка. Агрегирование, согласно методике, описанной в [8, 9], состоит из следующих этапов.

1. Разработка онтологии оцениваемого объекта:
 - формирование множества концептов;
 - определение связей между концептами (здесь – это «входит» и «руководит»);
 - формирование онтологии как графа, вершинами которого являются концепты, а дугами – выявленные связи.
2. Формирование на основе онтологии системы продукций вида:

$$\neg K_i \rightarrow \neg K', \quad (1)$$

где концепт K_i определяет состояние концепта K' .



3. Определение (или задание) ценностей концептов K_i для соответствующих концептов K^* . Ценность рассматривается в качестве истинности продукции (1). Этот этап выполняется с привлечением экспертов.

4. Формирование БЗ из полученных продукций.

5. Диалог с экспертной системой, выводящий агрегированную оценку на основе БЗ и оценок аудиторов, оценивающих по шкале $[0,1]$ (или эквивалентной ей 100-балльной шкале) эффективность работы функциональных элементов системы.

Порядок расчета агрегированной оценки

В основе метода агрегирования лежит логико-аксиологический подход, описанный в [8, 9]. Согласно ему, структура станции формализована системой продукций вида (1). Здесь $\neg K_i$ и $\neg K^*$ – утверждения о дефиците функциональности компонентов K_i и K^* . Истинность каждого из этих утверждений принадлежит отрезку $[0,1]$. Она называется характеризующим числом компонента. В свою очередь, с каждой продукцией связана степень ее истинности,

$$\|\neg K_i \rightarrow \neg K^*\|,$$

называемая ценностью K_i для K^* . Она тоже принадлежит этому отрезку. Метод опирается на аппарат нечетких логик, где истинность играет роль характеризующего числа компонента и показателя силы связи K_i с K^* . Импликация (1) – это утверждение о том, что утрата функциональности компонента K_i влечет утрату функциональности компонента K^* . Истинность импликации – степень этой утраты (задается экспертно). Если некоторый компонент K^* не принадлежит K^* , но способен влиять на него, говорится о компоненте влияния. Это формализуется продукциями вида $K^* \rightarrow K^*$ или $K^* \rightarrow \neg K^*$ в зависимости от характера влияния (положительное или отрицательное) [9].

Разберем порядок расчета. Он начинается с установления характеризующих чисел (показателей) функциональных элементов, которыми для ст. Амгалан, например, являются ДП, ГК, ВО, У, ЗБК, ПС, ТБПС, СтТл, СтХр, СтБт, СтНх, СтБн, СтХн, СтХт. Характеризующие числа функциональных элементов ДП, ГК, ВО, ЗБК, ПС, ТБПС устанавливаются аудиторами на основе каких-либо объективных показателей. Значения характеризующих чисел для СтТл, СтХр, СтБт, СтНх, СтБн, СтХн, СтХт, которые фактически являются подсистемами, вычисляются в соответствии с онтологиями, представленными на рис. 2.

Согласно [8], отличие от единицы каждого из этих чисел трактуется как дефект (ущерб) функционирования компонента, который, в свою очередь, порождает ущерб содержащей его подсистемы. Расчет доли ущерба ведется по правилу:

$$\neg K_i, \neg K_i \rightarrow \neg K^* \vdash \neg K^*: \|\neg K^*\| = \|\neg K_i\| \cdot \|\neg K_i \rightarrow \neg K^*\|, \quad (2)$$

которое рассматривается как нечеткий modus ponens. Если, как в нашем случае, подсистема состоит из нескольких компонентов: K_1, K_2, K_3 , и т.д., ущерб каждого из них порождает частный вклад в общий ущерб компонента K^* .

Полагаем, что для нормального функционирования станции необходимо нормальное функционирование всех ее компонентов. Тогда совокупный ущерб рассчитываем по правилу:

$$\|\neg K^*\| = \|\neg K^*\|_1 \oplus \|\neg K^*\|_2, \quad (3)$$

где $\|\neg K^*\|_1$ и $\|\neg K^*\|_2$ – частные вклады, обусловленные ущербами функционирования $\|\neg K^*\|_1$ и $\|\neg K^*\|_2$; $\oplus$ – так называемая t-конорма (в инфиксной записи), известная в нечеткой математике и применяемая для формализации дизъюнкции. Результат затем нормируется на единицу [9].



Эта процедура реализуется на основе технологии ЭС.

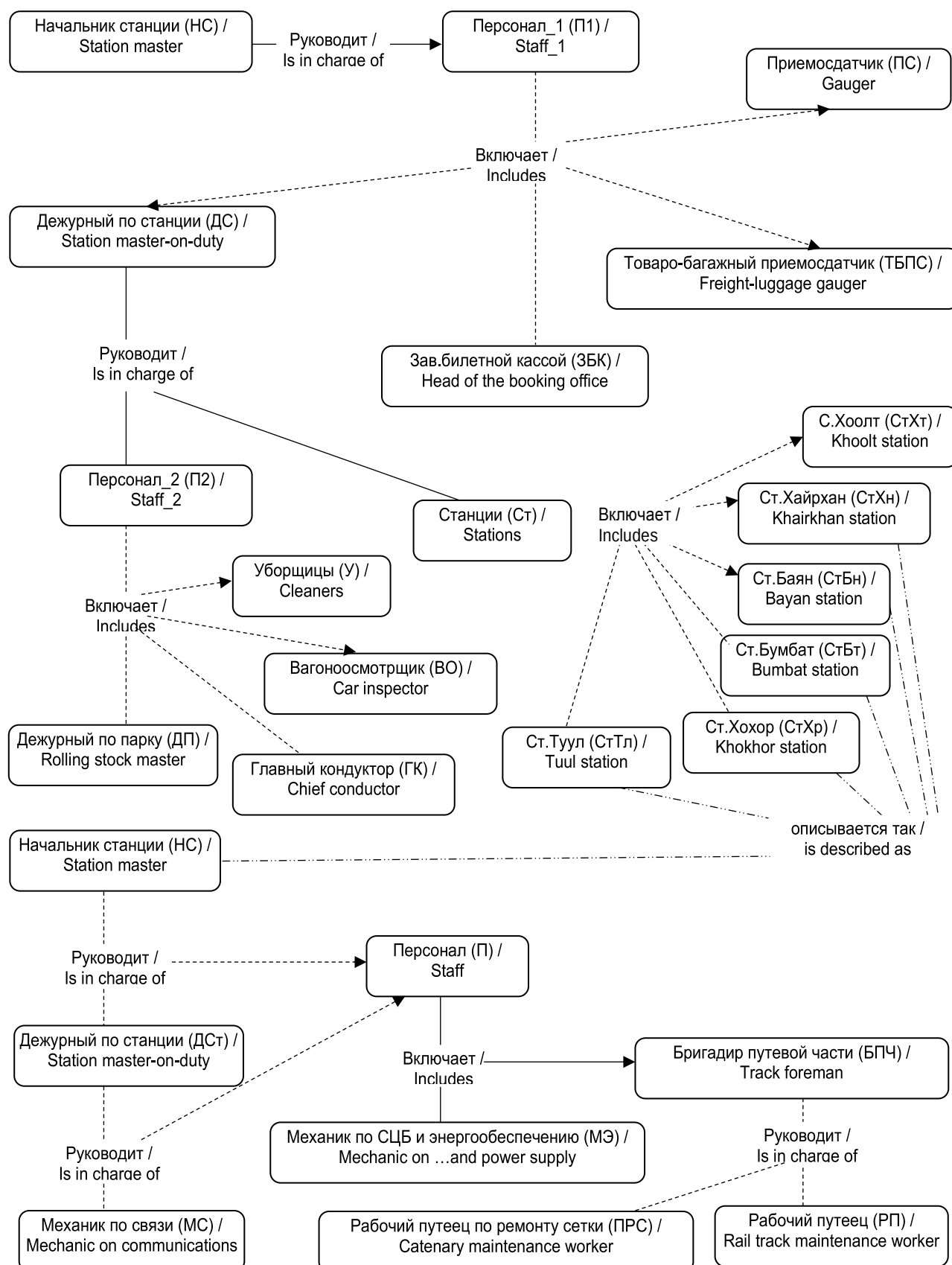


Рис. 3. Обобщенная онтология для станции Амгалан
Fig. 3. Generalized ontology for Amgalan station



Для станции Амгалан импликации вида (1) формируют продукционную БЗ вида:
 $\neg П1 \rightarrow \neg НС$, $\neg ПС \rightarrow \neg П1$, $\neg ТБПС \rightarrow \neg П1$, $\neg ЗБК \rightarrow \neg П1$, $\neg ДС \rightarrow \neg П1$, $\neg П2 \rightarrow \neg ДС$,
 $\neg Ст \rightarrow \neg ДС$, $\neg ДП \rightarrow \neg П2$, $\neg ГК \rightarrow \neg П2$, $\neg ВО \rightarrow \neg П2$, $\neg У \rightarrow \neg П2$, $\neg СтТл \rightarrow \neg Ст$, $\neg СтХр \rightarrow \neg Ст$,
 $\neg СтБт \rightarrow \neg Ст$, $\neg СтНх \rightarrow \neg Ст$, $\neg СтБн \rightarrow \neg Ст$, $\neg СтХн \rightarrow \neg Ст$, $\neg СтХт \rightarrow \neg Ст$.

Для каждой из подчиненных станций в свою очередь формируется единообразный набор продукций вида: $\neg ДСт \rightarrow \neg НСт$, $\neg П \rightarrow \neg НСт$, $\neg МС \rightarrow \neg ДСт$, $\neg П \rightarrow \neg ДСт$, $\neg МЭ \rightarrow \neg П$,
 $\neg БПЧ \rightarrow \neg П$, $\neg ПРС \rightarrow \neg БПЧ$, $\neg РП \rightarrow \neg БПЧ$.

Утверждение типа $\neg СтТл$ считаем тождественным утверждению $\neg НСт$ для соответствующей станции.

Учитывая, что фрагмент для подчиненных станций повторяется семь раз, общий объем БЗ составляет 74 продукции.

Характеризующее число компонента НС для ст. Амгалан рассматривается как характеризующее число всей системы.

Пример расчета

В качестве примера возьмем онтологию подчиненных станций. Зададим истинности продукций (все показатели условны):

$$||\neg ДСт \rightarrow \neg НСт|| = 1;$$

$$||\neg П \rightarrow \neg НСт|| = 0.5;$$

$$||\neg МС \rightarrow \neg ДСт|| = 0.7;$$

$$||\neg П \rightarrow \neg ДСт|| = 1;$$

$$||\neg МЭ \rightarrow \neg П|| = 0.8;$$

$$||\neg БПЧ \rightarrow \neg П|| = 0.8;$$

$$||\neg ПРС \rightarrow \neg БПЧ|| = 0.7;$$

$$||\neg РП \rightarrow \neg БПЧ|| = 1.$$

Согласно методике, каждая истинность рассматривается как ценность компонента в antecedенте для компонента в консеквенте продукции. Здесь 1 означает, что соответствующий компонент является ключевым, т.е. его нефункционирование влечет нефункциональность компонента в консеквенте. Например, для $||\neg ДСт \rightarrow \neg НСт|| = 1$ это означает, что невыполнение дежурным по станции своих должностных обязанностей есть невыполнение должностных обязанностей начальником станции.

Отметим также, что, несмотря на солидарную ответственность начальника станции и дежурного за работу персонала, вклад дежурного больше, что и отражено в показателе ценности. Это связано с тем, что основное назначение данных станций – оперативное обеспечение перевозочного процесса, за которое отвечает дежурный.

Предположим далее, что аудиторская оценка показателей эффективности работы функциональных элементов системы: РП (рабочий-путеец), ПРС (рабочий-путеец по ремонту сетки), МЭ (механик по СЦБ и энергообеспечению) и МС (механик по связи) дала значения 0.9, 0.9, 0.8, 0.9 соответственно (данные значения также условны и к реальным показателям



какой-либо станции отношения не имеют). Расчет на основе (2) дает следующие ущербы функциональности компонентов БПЧ и П:

$$||\neg\text{БПЧ}||_1 = ||\neg\text{РП}|| \cdot ||\neg\text{РП} \rightarrow \neg\text{БПЧ}|| = (1-0.9) \cdot 1 = 0.1;$$

$$||\neg\text{БПЧ}||_2 = ||\neg\text{ПРС}|| \cdot ||\neg\text{ПРС} \rightarrow \neg\text{БПЧ}|| = (1-0.9) \cdot 0.7 = 0.07.$$

Объединенная оценка ущерба функциональности компонента БПЧ согласно (3) может быть получена как

$$||\neg\text{БПЧ}|| = \max(||\neg\text{БПЧ}||_1, ||\neg\text{БПЧ}||_2) = \max(0.1, 0.07) = 0.1.$$

Функция $\max(\dots)$ в качестве t-нормы выбрана из тех соображений, что ущерб функциональности компонента БПЧ определяется наибольшим из ущербов, вызванных подчиненными компонентами с учетом роли этого компонента (руководитель оценивается по наилучшему исполнителю с учетом его места в системе). Аналогично поступаем и в остальных случаях. Далее:

$$||\neg\text{П}||_1 = ||\neg\text{БПЧ}|| \cdot ||\neg\text{БПЧ} \rightarrow \neg\text{П}|| = 0.1 \cdot 0.8 = 0.08;$$

$$||\neg\text{П}||_2 = ||\neg\text{МЭ}|| \cdot ||\neg\text{МЭ} \rightarrow \neg\text{П}|| = (1-0.8) \cdot 0.8 = 0.16;$$

$$||\neg\text{П}|| = \max(0.08, 0.16) = 0.16;$$

$$||\neg\text{ДСт}||_1 = ||\neg\text{П}|| \cdot ||\neg\text{П} \rightarrow \neg\text{ДСт}|| = 0.16 \cdot 1 = 0.16;$$

$$||\neg\text{ДСт}||_2 = ||\neg\text{МС}|| \cdot ||\neg\text{МС} \rightarrow \neg\text{ДСт}|| = (1-0.8) \cdot 0.7 = 0.14;$$

$$||\neg\text{ДСт}|| = \max(0.16, 0.14) = 0.16;$$

$$||\neg\text{НСт}||_1 = ||\neg\text{П}|| \cdot ||\neg\text{П} \rightarrow \neg\text{НСт}|| = 0.16 \cdot 0.5 = 0.08;$$

$$||\neg\text{НСт}||_2 = ||\neg\text{ДСт}|| \cdot ||\neg\text{ДСт} \rightarrow \neg\text{НСт}|| = 0.16 \cdot 1 = 0.16;$$

$$||\neg\text{НСт}|| = \max(0.08, 0.16) = 0.16.$$

Принимая во внимание соотношение [9]:

$$||K|| = 1 - ||\neg K||,$$

получаем:

$$||\text{НСт}|| = 1 - ||\neg\text{НСт}|| = 0.84.$$

Если переходить к 5-балльной оценке, например, согласно правилу:

[0, 0.6) – «плохо»;

[0.6, 0.8) – «удовлетворительно»;

[0.8, 0.9) – «хорошо»;

[0.9, 1] – «отлично»,



это соответствует общей оценке «хорошо».

Полный расчет эффективности функционирования железнодорожной станции, включающий показатели всех служб и подчиненных станций с последующим агрегированием, выполняется аналогично. Таким же путем может быть выполнен расчет для любой производственно-экономической системы, описываемой сходным образом. При этом никакие функциональные зависимости между ценностями компонентов, а также показателями их эффективности (характеризующими числами) не устанавливаются (например, сумма ценностей или показателей эффективности не обязана равняться 1). Все определяется только местом и значением каждого компонента в системе.

Заключение

На примере одного из объектов транспортной инфраструктуры республики Монголия рассмотрена методика агрегированной оценки производственно-экономической системы, учитывающая внутреннюю структуру объекта. Согласно методике на первом этапе разрабатывается онтология объекта. Концептами в ней являются службы/должностные лица, отношениями – отношения включения и подчиненности. На втором этапе на основе онтологии разрабатывается система продукции вида (1). Истинность каждой продукции интерпретируется как ценность компонента K_i для K^* . Третий этап – формирование БЗ ЭС агрегированного оценивания. Четвертый – расчет агрегата как нечеткий вывод в ЭС. Начальными (стартовыми) фактами при выводе являются утверждения о состоянии функциональных элементов системы – непосредственных исполнителей или низовых служб. Состояние каждого задается числом из интервала $[0, 1]$, которое выставляется аудитором или из иных соображений.

Несмотря на достаточно специальную предметную область – железнодорожное сообщение, – можно утверждать, что методика может применяться для агрегированного оценивания широкого класса производственно-экономических, социальных, технических и иных систем.

Библиографический список

1. Рахмангулов А.Н., Трофимов С.В., Корнилов С.Н. Управление транспортными системами. Магнитогорск: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ, 2001. 191 с.
2. Терешина Н.П., Галабурда В.Г., Трихунков М.Ф. Экономика железнодорожного транспорта. М.: УМЦ ЖДТ, 2006. 801 с.
3. Рахмангулов А.Н. Железнодорожные транспортно-технологические системы: организация функционирования. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 300 с.
4. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2000. 384 с.
5. Никоненко А.А. Обзор баз знаний онтологического типа // Искусственный интеллект, 2009. № 4. С. 208–219.
6. Аршинский Л.В., Доржсүрэн Х. Разработка базы знаний для агрегированной оценки качества функционирования станции Улан-Баторской железной дороги на основе технологии экспертных систем // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. Херсон: Видавництво ПП Вишемирський В.С., 2017. С. 191–193.
7. Муромцев Д.И. Концептуальное моделирование знаний в системе CMapTools. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2009. 83 с.
8. Аршинский Л.В. Логико-аксиологический подход к оценке состояния систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2013. № 3(39). С.140–146.
9. Аршинский Л.В. Методика агрегированного оценивания систем с поддержкой ключевых компонентов // Онтология проектирования. 2015. № 2(16). С. 233–245. DOI: <http://dx.doi.org/10.18287/2223-9537-2015-5-2-223-232>.

References

1. Rahmangulov A.N., Trofimov S.V., Kornilov S.N. *Upravlenie transportnymi si-stemami* [Transport system management]. Magnitogorsk: GOU VPO MGTU Publ., 2001, 191 p. (In Russian).
2. Tereshina N.P., Galaburda V.G., Trihunkov M.F. *Jekonomika zheleznodorozhnogo transporta* [Railway transport economy]. M.: UMC ZhDT Publ., 2006. 801 p. (In Russian).



3. Rahmangulov A.N. *Zheleznodorozhnye transportno-tehnologicheskie sistemy: organizacija funkcionirovanija* [Railway transport and technological systems: operation organization]. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov Publ., 2014, 300 p. (In Russian).
4. Gavrilova T.A., Horoshevskij V.F. *Bazy znaniy intellektual'nyh sistem* [Knowledge data bases of intelligence systems]. St. Petersburg: Peter Publ., 2000, 384 p. (In Russian)
5. Nikonenko A.A. The ontological knowledge bases review. *Iskusstvennyj intellekt* [Artificial Intelligence], 2009, no. 4, pp. 208–219. (In Russian).
6. Arshinskij L.V., Dorzhursen H. Development of knowledge base for aggregated quality estimation of the Ulan-Bator Railway station operation based on expert system technology // *Intelektual'ni sistemi priijnattja rishen' i problemi obchisljuval'nogo intelektu: Materiali mizhnarodnoï naukovoï konferencii*. Herson: Vidavnictvo PP Vishemirs'kij V.S., 2017, pp. 191–193.
7. Muromcev D.I. *Konceptual'noe modelirovanie znaniy v sisteme CMapTools* [Conceptual modeling of knowledge in CMapTools system]. St. Petersburg: St. Petersburg GU ITMO, 2009, 83 p. (In Russian).
8. Arshinskij L.V. Logic axiological approach to assessment of systems. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz, Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2013, no. 3(39), pp.140–146. (In Russian).
9. Arshinskij L.V. Aggregate method of estimating systems with support of key components. *Ontologija proektirovanija* [Ontology of Designing], 2015, no. 2(16), pp. 233–245. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.18287/2223-9537-2015-5-2-223-232>

Критерии авторства

Аршинский В.Л., Аршинский Л.В., Доржсурэн Хишигсурэн заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Arshinsky V.L., Arshinsky L.V., Dorzhsuren Khishigsuren 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.876.5: 519.872.6

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-45-56>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАССАЖИРОПОТОКОВ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

© М.Л. Жарков¹

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН),
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В работе представлена математическая модель входящего в транспортно-пересадочный узел пассажиропотока и реализующие ее имитационная модель и программный комплекс. **МЕТОДЫ.** Математическая модель основана на авторском подходе, в котором используется теория ВМАР-потоков. Преимуществом ВМАР является возможность единого описания нескольких входящих потоков заявок (как коррелированных, так и независимых) при сохранении их структуры. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Определены характеристики отдельных пассажиропотоков и построена их общая модель для действующего транспортно-пересадочного узла «Владыкино» в г. Москве. Также предложен алгоритм по генерированию ВМАР-потоков и проведен модельный эксперимент. Определены параметры ВМАР-потока, так чтобы моделируемое значение суммарного входящего пассажиропотока соответствовало объему пассажиров в транспортно-пересадочном узле «Владыкино» в час пик на 2025 г. **ВЫВОДЫ.** Полученные результаты в дальнейшем будут применены для общей оценки эффективности функционирования ТПУ, максимально допустимой нагрузки и определения «узких мест» в структуре пассажирского терминала.

Ключевые слова: математическое моделирование, многофазная система массового обслуживания, ВМАР-поток, программный комплекс.

Информация о статье. Дата поступления 05 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 22 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Жарков М.Л. Математическая модель и программный комплекс для определения статистических параметров пассажиропотоков в транспортных системах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 45–56. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-45-56

MATHEMATICAL MODEL AND PROGRAM COMPLEX TO DETERMINE STATISTICAL PARAMETERS OF PASSENGER FLOWS IN TRANSPORT SYSTEMS

M.L. Zharkov

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS,
134, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation.

ABSTRACT. PURPOSE. The paper presents a mathematical model of the passenger flow entering a transfer hub as well as a simulating model and a software complex implementing it. **METHODS.** The mathematical model is based on the author's approach, which uses the theory of BMAP-flows. The advantage of BMAP is the possibility of a single description of several incoming request flows (both correlated and independent) while maintaining their structure. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The characteristics of individual passenger flows have been determined and their general model has been built for the current transfer hub "Vladykino" in Moscow. An algorithm for BMAP flows generation has been proposed and a model experiment has been performed. The parameters of the BMAP flow have been determined considering the required correspondence of the simulated value of the total incoming passenger traffic and the volume of passengers in the Vladykino transfer hub in rush hours in 2025. **CONCLUSIONS.** The obtained results will find application in the general assessment of transfer hub operation efficiency, maximum permissible load and identification of "bottlenecks" in the structure of the passenger terminal.

Keywords: mathematical simulation, multiphase queuing systems, BMAP flow, software package

Article info. Received December 05, 2017; accepted January 22, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Zharkov M.L. Mathematical model and program complex to determine statistical parameters of passenger flows in transport systems. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 45–56. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-45-56

¹Жарков Максим Леонидович, программист, e-mail: zharkm@mail.ru
Maksim L. Zharkov, Programmer, e-mail: zharkm@mail.ru



Введение

Высокая интенсивность и плотность транспортных потоков являются характерными признаками крупных, быстро развивающихся городов, в свою очередь, это приводит к перегруженности дорожно-транспортной сети, возникновению «пробок» и снижению скорости передвижения наземного транспорта в черте города. Эффективным способом решения данных проблем является организация скоростных городских и пригородно-городских мультимодальных перевозок [1]. Для решения данной задачи требуются особые пассажирские терминалы, обеспечивающие быструю пересадку пассажиров в месте стыковки нескольких типов общественного транспорта и/или направлений движения, т.е. транспортно-пересадочные узлы или ТПУ [2]. Отметим, что такие объекты имеют сложную структуру и подвержены влиянию большого количества факторов, как детерминированных, так и стохастических. В таких случаях применение методов математического и имитационного моделирования, как правило, позволяет лучше понять происходящие процессы и способствует росту эффективности функционирования подобного рода систем.

Целью настоящей статьи является развитие математической модели входящего потока заявок в логистические системы [3], разработка на ее основе имитационной модели и модернизация программного комплекса для моделирования работы транспортно-логистических систем [4], а также апробация последних на конкретном примере. Математическая модель входящего пассажиропотока основана на относительно новой теории ВМАР-потоков (Batch Markovian Arrival Process), которую предложил Д. Лукантони [5], в развитии идеи М. Ньютса [6]. Отличительными особенностями ВМАР является: во-первых, возможность объединения нескольких отдельных потоков в единую структуру, что облегчает описание и теоретическое изучение сложных объектов [7]; во-вторых, учет случайного размера прибывающей группы [8]; в-третьих, удобство и компактность их представления в аналитическом виде. Учитывая вышесказанное, отметим, что модель входящего пассажиропотока становится более универсальной по сравнению со стандартными моделями [9, 10] и может быть применена для изучения различных входящих потоков, в частности транспортных [4, 7, 8, 11].

Объект исследования

Объектом для исследования выбран типовой ТПУ «Владыкино» (рис. 1, подробнее см. [12]), расположенный на границе между районами Марфино и Отрадным в г. Москве. Средняя плотность населения обоих районов 16,5 тыс. чел./км² (данные

на 2017 г.). Среднесуточный поток на данной ТПУ составляет 18,3 тыс. чел. (конец 2016 г.). Предполагаемый пассажиропоток в час пик на 2025 год (расчетный период): 11,8 тыс. чел. [12].

Определение характеристик входящих пассажиропотоков

В ТПУ «Владыкино» стыкуется четыре вида транспорта: личный транспорт, наземный общественный транспорт (автобус, троллейбус), метро, московское центральное кольцо (МЦК). Также часть общего входящего пассажиропотока составляют пассажиры, проживающие в данном районе и прибывающие в ТПУ пешком.

Рассмотрим характеристики основных входящих пассажиропотоков в наиболее загруженный период времени (с 7.00 до 10.00 – час пик).

1. Станция метро. В Московском метрополитене действуют вагоны серии 81-717 (головной) и 81-714 (промежуточный), по 8 вагонов в составе. Станция является



Рис. 1. Схема ТПУ «Владыкино»: 1 – платформа МЦК; 2 и  – вход в терминал ТПУ;
3 – автобусная остановка; 4 – вход в метро

Fig. 1. Scheme of "Vladykino" transfer hub: 1 – Moscow Central Ring platform;

2 and  – entrance to the transfer hub terminal; 3 – bus stop; 4 – metro entrance

промежуточной по пути следования. Для определения объемов пассажиров, готовых сойти на данной станции (в первом приближении), воспользуемся правилом Парето (80/20, округляя до целых), т.е. шесть вагонов отведем под нужды пассажиров, следующих мимо рассматриваемой станции. Среднюю плотность примем 5 чел./м^2 . Тогда размер прибывающей группы может достигать 300 человек. Средний интервал времени движения поездов в час пик – 2,5 минуты (2 направления движения), следовательно, интенсивность прибытия $\lambda_1 = 0,80$ состава в минуту.

2. Станция МЦК. На МЦК курсируют поезда модели ЭС2Г «Ласточка», длиной 6 вагонов с максимальной вместимостью 1200 пассажиров [13]. Отведем 4 вагона для нужд пассажиров, следующих мимо рассматриваемой станции (правило Парето). Тогда максимальная вместимость состава равна 300 человек. Интервал движения поездов в час пик – 6 минут (2 линии), интенсивность поступления составит $\lambda_2 = 0,34$ поезда в минуту.

3. Автобусная остановка. Через ав-

тобусные остановки при ТПУ «Владыкино» проходит 10 маршрутов (табл. 1) наземного общественного транспорта (автобусы, маршрутные микроавтобусы и др.) [14].

Установим закон распределения промежутков времени между поступлениями транспорта на остановку. Рассмотрим среднее число поступающих транспортных средств. В табл. 1 строка t_j содержит середины временных интервалов движения (в мин), строка c_j – число маршрутов, соответствующее группе j , строка n_j – среднее число поступлений в минуту, определенное по формуле $n_j = c_j / t_j$.

Рассмотрим время между поступлением транспортных средств как случайную величину. Данное предположение вполне логично, так как движение транспорта подвержено множеству различных стохастических факторов, например, отказ техники, загруженность полосы движения и т.д. Выборку интервалов времени между движением транспортных средств получим с помощью следующего модельного эксперимента.



Таблица 1

Характеристики автобусных маршрутов при ТПУ «Владыкино»

Table 1

Characteristics of bus routes at "Vladykino" transfer hub

№ группы (j) / No. of groups	1	2	3	4	Сумма / Total
№ маршрута / No. of route	154, 637, 238, М9, 76к	24к, 33, 76	24	85	–
Интервал движения (мин.) / Travel interval (min)	10–12	13–15	16–18	19–21	–
t_j	11	14	17	20	–
c_j	5	3	1	1	10
n_j	0,46	0,21	0,06	0,05	0,78

Алгоритм модельного эксперимента:

- Шаг 1. Генерируется набор случайных величин (СВ) $\{g^j\}$, где j – номер группы, к которой относится маршрут $j=\overline{1,4}$ (табл. 1), g_i^j – случайная величина (i – номер маршрута $i=\overline{1,10}$) с равномерным распределением (параметры зависят от интервала движения в группе j , см. табл. 1).

- Шаг 2. Выбирается g_i^j – минимальная величина из набора $\{g^j\}$ и принимается за точку первого поступления $r_1 = g_i^j$.

- Шаг 3. Генерируется новая величина v_i^j (по параметрам r_1) и подставляется в набор $\{g^j\}$ по правилу $g_i^j = v_i^j + r_1$.

- Шаг 4. Из нового набора вновь выбирается минимальная величина g_{i*}^j и принимается за точку поступления $r_2 = g_{i*}^j$.

- Шаг 5. Определяется величина $x = r_2 - r_1$, т.е. время между поступлениями

транспортных средств на остановку при ТПУ. Величина x добавляется в выборку $\{x\}$, переменная r_1 принимает значение r_2 .

- Шаг 6. Шаги 3–5 повторяются n раз.

По сгенерированной выборке $\{x\}$ составлен интервальный вариационный ряд (табл. 2) распределения промежутков времени между поступлением транспортных средств в систему. Число временных интервалов $k = 7$, строка t_j содержит середины временных интервалов (мин.).

На основе данных интервального вариационного ряда построим гистограмму (см. рис. 2). По ее виду выдвинем гипотезу, что интервал времени между поступлением транспортных средств имеет экспоненциальное распределение. С помощью метода моментов [15] получен параметр данного распределения $\lambda_3 = 0,78$.

Далее на рис. 2. представлены гистограмма частостей распределения промежутков времени между поступлением

Таблица 2

Интервальный вариационный ряд распределения промежутков времени между поступлением транспортных средств на автобусную остановку при ТПУ «Владыкино»

Table 2

Interval variation series of time interval distribution between the arrival of vehicles at the bus stop at "Vladykino" transfer hub

t_j	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5
Число попаданий / Number of hits	57	25	8	5	4	1	0

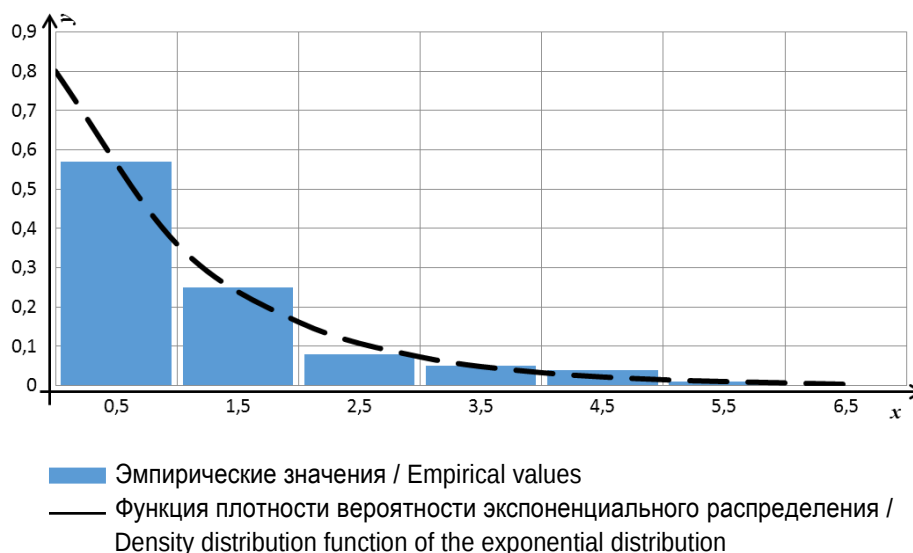


Рис. 2. Гистограмма частот и график функции плотности вероятности экспоненциального распределения

Fig. 2. Frequency histogram and the graph of the density distribution function of the exponential distribution

транспортных средств на автобусную остановку при ТПУ «Владыкино», а также график функции плотности вероятности экспоненциального распределения с параметром $\lambda_3 = 0,78$. По оси x отложены середины интервалов времени (мин), по оси y – относительные частоты.

Выполним проверку согласия теоретического закона распределения и модельных (эмпирических) данных с помощью критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова [15]. Эмпирическое значение критерия Пирсона равно $\chi^2_{набл} = 2,76$, критическое значение – $\chi^2_{крит} = 7,78$ при количестве степеней свободы $r = 4$ и уровне значимости $\alpha = 0,1$ (более высокий уровень значимости для инженерных задач не требуется). Эмпирическое значение критерия Колмогорова-Смирнова – $K_{набл} = 0,29$, что меньше критического $K_{крит} = 0,99$. Значения модельных (эмпирических) показателей в обоих случаях меньше критических значений, следовательно, нет оснований отвергать гипотезу. Таким образом, поток наземного общественного транспорта (не пассажиров) можно считать простейшим [9] с интенсивностью поступления $\lambda_3 = 0,78$ транспортных средств в минуту.

Пассажиры, как упоминалось ранее, прибывают на остановку в транспортном средстве, т.е. группами. В настоящее вре-

мя большую часть столичного автобусного парка (Мосгортранс) составляют автобусы (емкостью до 100 чел.) и маршрутные микроавтобусы (емкостью около 18 человек) с примерным соотношением один к пяти (натурное наблюдение по видеорекамам). При этом автобусные станции при ТПУ «Владыкино» не являются конечными (см. [14]). Примем, что средний размер прибывающей группы составляет 30 человек.

Допустим, что размер прибывающей группы во всех представленных выше пассажиропотоках является случайной величиной, имеющей нормальное распределение с индивидуальными параметрами (см. табл. 4).

4. Перехватывающая парковка. Естественным предположением является тот факт, что на парковку, в основном, поступают легковые автомобили, максимальная вместимость которых не превосходит 7 человек. По данным [16] среднее число пассажиров в салоне составляет 1,34 человека. Примем, что число пассажиров является случайной величиной и подчиняется геометрическому закону распределения. Его параметр будет равен $1 / 1,34 = 0,75$.

Данные для исследования интенсивности поступления автомобилей на перехватывающие парковки Москвы получены из [17], при выполнении наблюдений



фиксировалось число занятых мест на 16 парковках (суммарно 5240 машиномест) в следующие моменты времени: 7:00, 8:00, 9:00 и 10:00 (по МСК). Период наблюдения составил 12 рабочих дней с 10.04.2017 по 24.04.2017. Следует отметить, что информация по парковке при ТПУ «Владыкино» не отражается на представленном ресурсе. Поэтому используем усредненный показатель интенсивности прибывающего потока автомобилей на перехватывающие парковки Москвы. В табл. 3 представлено суммарное число занятых мест на 16 парковках за период наблюдения.

Средняя интенсивность поступления автомобилей на перехватывающие парковки г. Москвы в период с 7:00 по 10:00 составит $\lambda_4 = 1,05$ автомобилей в минуту.

5. Пешеходы. Пассажиропоток пешеходов утром в час пик для ТПУ «Владыкино» составляет около 1,94 тыс. чел. Данный показатель получен из следующих соображений: зона пешей доступности составляет 500–700 м. от ТПУ, в которой проживает около 15,6 тыс. чел. (основано на средней плотности населения в районе); высокая популярность метро – в среднем 35% населения Москвы пользуется метро [18]; 36% объема пассажиропотока в утренний период приходится на час пик [19], т.е. с 7:00 до 10:00. Тогда средняя интенсивность прибытия пешеходов равна $\lambda_5 = 16,17$ чел./мин. Также следует учесть, что пассажиры могут приходить в ТПУ группами. Примем, что размер группы пе-

шиходов – случайная величина, имеющая нормальное распределение с параметрами $N(7, 2)$. Уменьшим интенсивность прибытия λ_5 на средний размер прибывающей группы (в 7 раз), чтобы сохранить размер пассажиропотока в утренний час пик. Тогда интенсивность поступления групп составит $\lambda_5 = 2,31$ в минуту.

Предположим, что время между двумя прибывающими в ТПУ группами, не важно из какого входящего потока, имеет экспоненциальное распределение. Данное предположение основано на следующем: поток транспорта на автобусные остановки при ТПУ «Владыкино» имеет экспоненциальное распределение интервалов времени между поступлениями; для входящих потоков 4 и 5 можно принять, что время между поступлениями имеет такое же распределение [9], но с индивидуальными параметрами. При этом суммарная интенсивность данных потоков (3, 4 и 5) преобладает над суммой интенсивностей двух других (1 и 2). Из чего следует, что экспоненциальное распределение имеет наибольшее влияние на распределение времени между двумя прибывающими группами из общего потока. В результате проверки по аналогии с представленным выше алгоритмом можно заключить, что нет оснований отвергать данную гипотезу.

Полученные характеристики входящих пассажиропотоков представлены в табл. 4.

Таблица 3
Статистика числа занятых мест на перехватывающих парковках г. Москвы

Table 3

Statistics of the number of occupied places in intercepting parkings in Moscow

Дата / время Date / time	7:00	8:00	9:00	10:00	Дата / время Date / time	7:00	8:00	9:00	10:00
07.04.2017	1062	3448	3935	4306	17.04.2017	1065	2966	3331	4052
10.04.2017	910	3040	3884	4241	18.04.2017	1052	3170	3757	4010
11.04.2017	749	2976	3338	3614	19.04.2017	1146	3235	3706	4053
12.04.2017	425	2328	2902	3244	20.04.2017	1156	3375	3914	4147
13.04.2017	966	2942	3743	3906	21.04.2017	1047	3089	3745	4111
14.04.2017	670	2780	3539	3922	24.04.2017	1050	2839	3925	4108



Таблица 4

Характеристики входящих пассажиропотоков в ТПУ «Владыкино»

Table 4

Characteristics of incoming passenger traffic flows in "Vladykino" transfer hub

Пассажиропоток / Passenger traffic	Метро / Metro	МЦК / Moscow Central Ring	Автобус / Bus	Личный Транспорт / Personal transport	Пешеход / Pedestrian
Интенсивность / Intensity	$\lambda_1 = 0,80$	$\lambda_2 = 0,34$	$\lambda_3 = 0,78$	$\lambda_4 = 1,05$	$\lambda_5 = 2,31$
Вероятность Поступления / Arrival probability	0,152	0,064	0,148	0,199	0,437
Закон распределения размера групп	$N(100, 40)$	$N(150, 30)$	$N(30, 6)$	$Geom(0,75)$	$N(7, 2)$

Примечание. $Geom(x)$ – геометрическое распределение с параметром x , $N(\mu, \sigma)$ – нормальное распределение с параметрами μ (математическое ожидание) и σ (стандартное отклонение).

Note. $Geom(x)$ – geometric distribution with x parameter, $N(\mu, \sigma)$ – normal distribution with μ (mathematical expectation) and σ (standard deviation) parameters.

ВМАР-поток

Математически описать все входящие в ТПУ пассажиропотоки возможно единой моделью ВМАР-потока, которая задается «управляющим процессом» – цепью Маркова (ЦМ) v_t с непрерывным временем и конечным пространством состояний $\{0, 1, \dots, N\}$ [10]. Время пребывания ЦМ в состоянии v задано экспоненциальным распределением с параметром λ_i , $i = \overline{0, N}$. После завершения пребывания в состоянии i ЦМ с вероятностью $p_{ir}^{(k)}$ перейдет в состояние r , $r = \overline{0, N}$, причем прибудет группа размера $k \geq 0$. Отметим, что переход цепи v_t из состояния i в это же состояние возможен только вместе с поступлением группы $k \geq 1$. Соответственно, предполагается, что вероятности $p_{ir}^{(k)}$ удовлетворяют условию нормировки:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{r=0}^N p_{ir}^{(k)} + \sum_{r=0, r \neq i}^N p_{ir}^{(0)} = 1, \quad i = \overline{0, N}.$$

Параметры ЦМ удобно хранить в матричном виде D_i , $i = \overline{0, 300}$ (где 300 – наибольший размер группы) размера 5×5 (по числу потоков, табл. 4), элементы которых определяются следующим образом:

$$d_{v,r}^{(k)} = \lambda_v p_{v,r}^{(k)}, \quad k \geq 1;$$

$d_{v,v}^{(0)} = -\lambda_v$; $d_{v,r}^{(0)} = \lambda_v p_{v,r}^{(0)}$, $v \neq r$, где λ_v – интенсивность поступления потока v . Естественное требование к матрицам D_k , $k \geq 1$ заключается в том, что все они ненулевые. Отметим, что в случае, когда D_k , $k \geq 2$ – нулевые матрицы, поток не является групповым, т.е. становится МАР-потоком.

В нашем случае элементы матриц D_i , $i \geq 0$ вычисляются по следующим формулам:

$$d_{v,r}^{(k)} = \lambda p_{v,r}^{(k)}, \quad k \geq 1;$$

$$d_{v,v}^{(0)} = -\lambda; \quad d_{v,r}^{(0)} = \lambda p_{v,r}^{(0)}, \quad v \neq r,$$

где $\lambda = \sum \lambda_i$ – суммарная интенсивности поступления всех пассажиропотоков. Объясняется это тем, что рассматриваемые пассажиропотоки независимы между собой. Поэтому ввиду специфики задания ВМАР-потока интенсивности отдельных пассажиропотоков необходимо суммировать.

Пассажиропотоки в транспортных системах имеют некоторые особенности. Например, стремление пассажира пересесть на другой вид транспорта, т.е. прибывшие на станцию МЦК пассажиры должны быть направлены на станцию метро, автобусную остановку и т.д. Добавим тип для каждой заявки, в зависимости от номе-



ра пассажиропотока в котором заявка образовалась. Это позволит определить ее маршрут в системе.

Отметим, что модель ВМАР-потока обобщает многие известные модели пото-

ков, как: пуассоновский поток, SM-поток (полумарковский поток), ММРР-поток (Markov Modulated Poisson Process – марковский модулированный пуассоновский процесс), и др. [10].

Алгоритм разыгрывания ВМАР-потока

Алгоритм разыгрывания имеет два этапа: подготовительный и цикл генерации.

На подготовительном этапе создаются два двумерных массива. Первый содержит вероятности поступления групп определенного размера для каждого потока, имеет размер $a \times b$, где a – число входящих потоков, b – максимальный размер группы из всех потоков. Второй хранит вероятности перехода ЦМ между своими состояниями, имеет размер $a \times a$. Создание двух массивов для хранения всей информации о ВМАР-потоке вместо одного общего позволяет уменьшить объем вычислений на перебор элементов массива.

В цикле генерации разыгрывается случайное число (генератор №1), с помо-

щью которого из массивов определяется новое состояние управляющей цепи и Vg – размер прибывающей группы. По новому состоянию управляющей цепи генерируется t_{in} – время пребывания цепи в этом состоянии (генератор № 2) с экспоненциальным распределением и тип каждой заявки из прибывшей группы. Схема цикла генерации представлена на рис. 3.

Данный алгоритм реализован в виде модуля к программному комплексу [4], который предназначен для численного расчета стационарных вероятностей и определения функциональных характеристик транспортно-логистических систем. Также программный модуль позволяет проводить многовариантные сценарные расчеты.

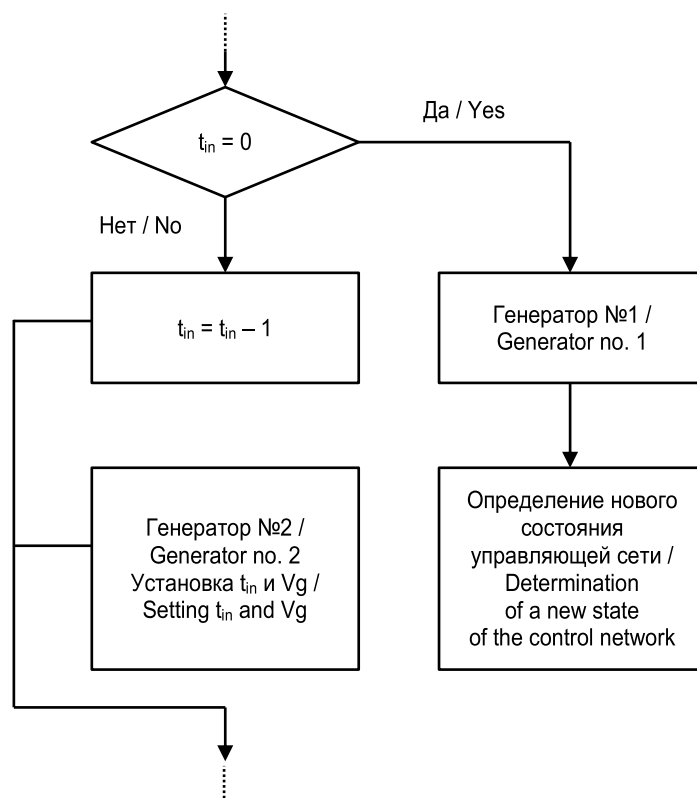


Рис. 3. Блок-схема цикла генерации ВМАР-потока
Fig. 3. Block diagram of the BMAP stream generation cycle



Модельный эксперимент

Установим параметры входящего ВМАР-потока, чтобы моделируемое значение суммарного входящего пассажиропотока соответствовало ожидаемому числу прибывающих в ТПУ пассажиров за час пик на 2025 г. Отметим, что в данном эксперименте не учитываются типы заявок, так как они не влияют на моделируемый объем входящего пассажиропотока.

Параметры ВМАР-потока в дальнейшем будут использованы в авторской модели работы транспортно-логистической системы [7, 11]. Что позволит определить будущую нагрузку и функциональные характеристики работы ТПУ «Владыкино», а также его максимальной пропускной способности и «узкие места» в структуре.

Далее в табл. 5 представлены усредненные данные по 10 пускам при интенсивностях ВМАР-потока $\lambda = 5,28$ (суммарная интенсивность всех пассажиропотоков), $\lambda = 2,64$ (суммарная интенсивность уменьшена в 2 раза) и $\lambda = 3$. Характеристики входящих пассажиропотоков представ-

лены в табл. 4. Время моделирования – три часа виртуального времени.

Очевидно, что при $\lambda = 3$ среднее число прибывающих в ТПУ пассажиров приближается к планируемому (на 2025 г.) показателю среднего объема пассажиропотока в час пик.

Таким образом, для ТПУ «Владыкино» установлены параметры основных входящих пассажиропотоков (табл. 4) и создана модель (ВМАР) общего входящего потока пассажиров. Отличительным свойством последней является то, что время между двумя прибывающими группами (не важно, из какого входящего пассажиропотока), также имеет экспоненциальное распределение. С помощью модельного эксперимента определены параметры ВМАР-потока, при которых расчетное значение суммарного входящего пассажиропотока соответствует ожидаемому объему пассажиров в ТПУ «Владыкино» в час пик на 2025 г. [12].

Таблица 5

Данные по 10 пускам имитационной модели

Table 5

Data on 10 simulator startups

№ / No.	$\lambda = 5,28$		$\lambda = 2,64$		$\lambda = 3$	
	Групп / Groups	Заявок / Requests	Групп / Groups	Заявок / Requests	Групп / Groups	Заявок Requests
1	627	20774	292	9650	354	10171
2	639	21153	323	10071	382	11508
3	654	21279	328	9773	327	10806
4	620	20076	327	11600	362	12621
5	633	21542	301	9121	391	11757
6	645	21690	311	10418	356	10850
7	646	23102	332	12022	362	11380
8	597	19119	373	13503	359	11938
9	607	21463	334	11363	351	11568
10	643	20108	345	11388	377	12306
Среднее / Average	631,10	21030,60	326,60	10890,90	362,10	11490,50



Заключение

В данной статье предложена общая математическая модель входящего пассажиропотока в транспортно-пересадочный узел, базирующаяся на теории ВМАР-потоков. Модель применима для описания входящих потоков в различные логистические системы (как пассажирские, так и грузовые), а также для объединения нескольких входящих потоков с индивидуальными характеристиками в единую структуру. Это позволяет существенно облегчить описание и исследование сложных объектов, например, аэропорты, вокзалы и др., особенно в условиях изменения характеристик входящих потоков. Введение же типов заявок позволяет описать поведение различных потоков заявок внутри изучаемых систем, и тем самым точнее отразить их внутренние процессы.

На основе математической модели создана имитационная модель, реализованная в виде модуля для программного комплекса [4]. Программный модуль успешно апробирован при расчете параметров и объема пассажиропотока, входящего в функционирующий ТПУ «Владыкино». Полученные результаты в дальнейшем будут применены для общей оценки эффективности функционирования ТПУ, максимально допустимой нагрузки и определения «узких мест» в структуре пассажирского терминала.

Отметим также, что согласно Генеральному плану развития города Иркутска [20] планируется размещение четырех узлов внешнего назначения и шести ТПУ городского назначения, и запланирован вывод из центральных районов транзитных транспортных потоков путем создания скоростного транспортного кольца с новыми развязками. Такие изменения приведут к необходимости пересмотра имеющихся и введению новых маршрутов движения общественного транспорта. Для определения их эффективности потребуются оценки как уровня обслуживания системы общественного транспорта в целом [21], так и в планируемых ТПУ [22]. При этом без адекватной модели входящих пассажиропотоков количественное определение нагрузки на такие системы может оказаться весьма затруднительным.

Дальнейшее развитие модели входящего пассажиропотока подразумевает введение учета суточных и сезонных колебаний. Что позволит установить изменение нагрузки за продолжительный период времени, т.е. минимальную и максимально возможную загруженность системы.

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ, проект № 16-06-00464, № 18-07-00604, и Совета по грантам Президента РФ, государственная поддержка ведущих научных школ РФ (НШ-8081.2016.9).

Библиографический список

1. Вукан Р.В. Транспорт в городах, удобных для жизни. Серия: Университетская библиотека А. Погорьского Пер. с англ. М.: Изд-во Территория будущего, 2011. 576 с.
2. Власов Д.Н. Транспортно-пересадочные узлы крупнейшего города (на примере Москвы). М.: АСВ, 2009. 96 с.
3. Жарков М.Л., Парсюроева П.А., Казаков А.Л. Моделирование работы станций и участков железнодорожной сети на основе изучения отклонений от графика движения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. Т. 53. № 6. С. 23–31.
4. Жарков М.Л., Казаков А.Л., Лемперт А.А. Логистический терминал как немарковская система массового обслуживания // Информационные и математические технологии в науке и управлении: тр. XX Байкальской Всерос. конф. (г. Иркутск 29 июня – 7 июля 2015 г.). Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. С. 36–44.
5. Lucantoni D.M. New results on single server queue with a batch Markovian arrival process // Commun. Statist. Stochastic Models. 1991. Vol. 7. P. 1–46.
6. Neuts M.F. A versatile Markov point process // Journal of Applied Probability. 1979. Vol. 16. P. 764–779.
7. Казаков А.Л., Лемперт А.А., Жарков М.Л. Моделирование транспортно-пересадочных узлов на основе систем массового обслуживания: многофазных и с ВМАР-потоком // Вестник УРГУПС. 2016. № 4 (32), С. 4–15.
8. Журавская М.А., Казаков А.Л., Жарков М.Л.,



Парсюрова П.А. Моделирование пассажиропотоков в современных транспортно-пересадочных узлах мегаполиса на основе немарковской системы массового обслуживания / Транспорт Урала. № 3 (46). 2015. С. 17–23.

9. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1966. 432 с.

10. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: Изд-во БГУ, 2000. 176 с.

11. Жарков М.Л., Казаков А.Л., Лемперт А.А. Об определении критических показателей работы транспортно-пересадочного узла на основе многофазной системы массового обслуживания // Вестник УРГУПС. 2017. №3 (35), С. 40–52.

12. Транспортно-пересадочный узел «Владыкино» [Электронный ресурс]. URL: <http://mkzd.ru/passengers/vladykino/> (25.10.2017).

13. Подвижной состав МЦК [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mosmetro.ru/mcc/ps/> (15.07.2017).

14. Маршруты городского транспорта Москвы [Электронный ресурс]. URL: <http://msk.rusavtobus.ru/> (19.04.2017).

15. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 2000. 480 с.

16. В будние дни каждая машина Москвы везет в среднем 1,3 человека [Электронный ресурс]. URL: [http://carclub.ru/news/russia/v_budnie_dni_kazhdaya_mashina_moskvy_vezet_v_srednem_13_chelove-](http://carclub.ru/news/russia/v_budnie_dni_kazhdaya_mashina_moskvy_vezet_v_srednem_13_cheloveka.html)

[ka.html](http://carclub.ru/news/russia/v_budnie_dni_kazhdaya_mashina_moskvy_vezet_v_srednem_13_cheloveka.html) (17.05.2017).

17. Перехватывающие парковки [Электронный ресурс]. URL: http://metro-parking.ru/metro_parking/ (15.07.17).

18. Итоги работы транспортного комплекса за 2016 год и планы на 2017 год [Электронный ресурс]. URL: http://transport.mos.ru/common/upload/docs/14852537_07_Otchetza2016god.pdf (15.07.17).

19. Статистика. Пассажиропоток в метро [Электронный ресурс]. URL: <http://metro-spb.ru/statisticheskie-dannye.htm> (Дата обращения: 15.07.17).

20. Об утверждении программы комплексного развития транспортной инфраструктуры города Иркутска на 2016–2025 годы (с изменениями на: 30.03.2017) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/444821573> (25.10.2017).

21. Михайлов А.Ю., Копылова Т.А. Разработка оценочной шкалы продолжительности пересадок в интермодальных узлах городского пассажирского транспорта // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 12 (107). С. 258–263.

22. Копылова Т.А., Михайлов А.Ю. Анализ компактности интермодальных узлов городского пассажирского транспорта при определении градостроительного потенциала территории транспортно-пересадочных узлов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4 (123). С. 166–175.

References

1. Vukan R.V. Transportation for Livable Cities, 2011, 576 p. (Russ. ed.: *Transport v gorodah, udobnyh dlja zhizni*. Moscow, Territory of the future, 2011, 576 p.)

2. Vlasov D.N. *Transportno-peresadochnye uzly krupneshogo goroda (na primere Moskvy)* [Transport hubs of the major city (on example of Moscow)]. Moscow, ASV Publ., 2009, 96 p. (In Russian).

3. Zharkov M.L., Parsyurova P.A., Kazakov A.L. Modeling operation of railway stations and rail network sections based on studying train schedule deviations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State University], 2014, no. 6 (89), pp. 23–31. (In Russian).

4. Zharkov M.L., Kazakov A.L., Lempert A.A. *Logisticheskij terminal kak nemarkovskaja sistema massovogo obsluzhivaniya* [Logistics terminal as a non-Markov queue]. *Materialy XX Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii "Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii"* [Materials of XX Baikal All Russia Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management", Irkutsk, June 29 – July 7, 2015]. Irkutsk: ISEM SB RAS, 2015, vol. 1, pp. 36–44. Irkutsk, 2015. pp. 36–44. (In Russian).

5. Lucantoni D.M. New results on single server queue with a batch Markovian arrival process // Commun.

Statist. Stochastic Models. 1991, vol. 7, pp. 1–46.

6. Neuts M.F. A versatile Markov point process // *Journal of Applied Probability*. 1979, vol. 16, pp. 764–779.

7. Kazakov A.L., Lempert A.A., Zharkov M.L. Modeling transport transfer hubs on the basis of multiphase and BMAP-flow mass transit systems. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija* [Herald of the Ural State University of Railway Transport], 2016, no. 4 (32), pp. 4–15. (In Russian).

8. Zhuravskaya M.A., Kazakov A.L., Zharkov M.L., Parsurova P.A. Simulating the operation of transport hub of a metropolis as a three-phase queueing system. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2015, no. 3, pp. 17–22. (In Russian).

9. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. *Vvedenie v teoriju massovogo obsluzhivaniya* [Introduction to queueing theory]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 432 p. (In Russian).

10. Dudin A.N., Klimenok V.I. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi potokami* [Queueing systems with correlated flows]. Минск: Belarusian State University Publ., 2000, 176 pp.

11. Zharkov M. L., Kazakov A. L., Lempert A. A. Determination of the critical parameters of work transport interchange hub based on multiphase queueing system. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej*



soobshhenija [Herald of the Ural State University of Railway Transport], 2017, no. 3 (35), pp. 40–52. (In Russian).

12. *Transportno-peresadochnyj uzel «Vladykino»* [“Vladykino” transport hub]. Available at: <http://mkzd.ru/passengers/vladykino/> (accessed 25 November 2017).

13. *Podvizhnoj sostav MCK* [Rolling stock of Moscow Central Ring] Available at: <http://www.mosmetro.ru/mcc/ps/> (accessed 19 April 2017).

14. *Marshruty gorodskogo transporta Moskvy* [Moscow City Transport Routes]. Available at: <http://msk.rusavtobus.ru/> (accessed 19 April 2017).

15. Ventcel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of probability and its engineering applications]. Moscow, Nauka Publ., 2000, 480 pp. (In Russian).

16. *V budnie dni kazhdaja mashina Moskvy vezet v srednem 1,3 cheloveka* [Every Moscow car carries an average of 1.3 people on weekdays]. Available at: http://carclub.ru/news/russia/v_budnie_dni_kazhdaja_mashi-na_moskvy_vezet_v_srednem_13_cheloveka.html (accessed 17 May 2017).

17. *Perehvatyvajushhie parkovki* [Intercepting parking]. Available at: http://metro-parking.ru/metro_parking/ (accessed 15 July 2017).

18. *Itoги raboty transportnogo kompleksa za 2016 god i plany na 2017 god* [Results of transport complex work

for 2016 and plans for 2017]. Available at: http://transport.mos.ru/common/upload/docs/14852537_07_Otchetza2016god.pdf (accessed 15 July 2017).

19. *Statistika. Passazhiropotok v metro* [Statistics. Passenger traffic in metro]. Available at: <http://metro-spb.ru/statisticheskie-dannye.htm> (accessed 19 April 2017).

20. *Ob utverzhdenii programmy kompleksnogo razvitiya transportnoj infrastruktury go-roda Irkutsk na 2016–2025 gody (s izmenenijami na: 30.03.2017)* [On approval of the program for the integrated development of the transport infrastructure of the city of Irkutsk for the period from 2016 to 2025 (as amended on 30 March 2017)] [Electronic resource]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/444821573> (accessed 25 October 2017).

21. Mikhailov A.Y., Kopylova T.A. Development of the scale to assess interchange duration at intermodal hubs of urban passenger transport. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 12 (107), pp. 258–263. (In Russian).

22. Kopylova T.A., Mikhailov A.Y. Compactness analysis of urban passenger transport intermodal nodes when determining TIH area urban development potential. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, no. 4 (123), pp. 166–175. (In Russian).

Критерии авторства

Жарков М.Л. полностью подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Zharkov M.L. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 004. 891. 3

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-57-66>

АНАЛИЗ МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

© В.В. Илющенко¹

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В данной работе проведен анализ инструментальных средств и методики создания новых экспертных систем с использованием оболочек экспертных систем (ЭС). **МЕТОДЫ.** В процессе эксплуатации автоматизированных систем управления технологическими установками постоянно приходится оценивать значения различных параметров. При этом нередко случаи, когда значения этих параметров не удается получить традиционными методами (непосредственно измерить или вычислить по известным аналитическим зависимостям). Такая ситуация особенно характерна для систем с высоким уровнем неопределенности, не имеющих достаточной предыстории функционирования. В этих случаях приходится пользоваться эвристическими методами, основанными на оценках специалистов-экспертов в соответствующей области. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** По результатам проведенного исследования систематизированы знания по применению методики создания новых экспертных систем с использованием оболочек ЭС, учитывающей особенности различных инструментальных средств программирования и позволяющей достигнуть более высокой эффективности за счет перебора большего числа альтернатив при выборе решения. **ВЫВОДЫ.** Методика создания с использованием оболочек ЭС, опираясь на высококачественный опыт группы специалистов, анализирует влияние большего объема новых факторов, оценивая их при построении стратегий, а также добавляя возможности прогноза.

Ключевые слова: искусственный интеллект, инструментальные средства программирования, логические исчисления, фреймы, семантические сети, производственные системы.

Информация о статье. Дата поступления 22 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 23 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Илющенко В.В. Анализ методики создания и инструментальных средств разработки систем искусственного интеллекта // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 57–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-57-66

ANALYSIS OF METHODS AND TOOLS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM DEVELOPMENT

V.V. Ilyushchenko

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

ABSTRACT. PURPOSE. The paper provides the analysis of tools and methods of new expert system development using expert system shells. **METHODS.** The operation process of automated control systems of process plants requires constant estimation of the values of various parameters. It is often when these parameter values can not be obtained by traditional methods involving direct measurement or calculation by known analytical dependencies. This situation is especially typical for the systems with a high level of uncertainty which do not have a sufficient past history of operation. Heuristic methods based on the assessments of experts in the relevant field are appropriate in this case. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The obtained results of the study have allowed to systematize the knowledge on the application of the development methods of new expert systems using expert system (ES) shells which take into account the features of different programming tools and provide higher efficiency through the exhaustive search for more alternatives when choosing a solution. **CONCLUSIONS.** Based on the high-quality experience of a group of specialists the development methods using ES shells analyze the effect of a larger volume of new factors through their evaluation under the construction of strategies and addition of prediction capabilities.

Keywords: artificial intelligence, programming tools, logical calculi, frames, semantic networks, production systems

Article info. Received November 22, 2017; accepted January 23, 2018; available online February 27, 2018.

¹Илющенко Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрического транспорта Института энергетики, e-mail: iluchenko_62@mail.ru

Vladimir V. Ilyushchenko, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport of the Institute of Power Engineering, e-mail: iluchenko_62@mail.ru



For citation: Ilyushchenko V.V. Analysis of methods and tools of artificial intelligence system development. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 57–66. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-57-66

Введение

Для создания систем искусственного интеллекта (ИИ) и экспертных систем (ЭС), в частности, необходимо использование специальных инструментальных средств (ИС) программирования.

В последние годы, с появлением мощных компьютеров и новых инструментальных средств, предоставляющих разработчику широкий спектр возможностей, процесс создания экспертных систем претерпел значительные изменения. Существенно сократились сроки разработки, а также снизилась трудоемкость построения ЭС. Существующая на сегодняшний день классификация инструментальных средств, позволяет представить их в виде трех основных типов [1]:

- языки программирования высокого уровня;
- среды программирования для создания ЭС;
- оболочки ЭС (интегрированные с языками высокого уровня).

К числу языков программирования относятся языки обработки символьной информации, наиболее известными из которых являются PROLOG и LISP – языки высокого уровня, имеющие строгое теоретическое обоснование и ориентированные на использование концепций и методов математической логики. Как следует из названия, язык PROLOG предназначен для программирования экспертных систем в терминах логики. Основной особенностью PROLOG, отличающей его от всех других языков, является декларативный характер написанных на нем программ. Язык LISP отличается способностью обрабатывать списковые структуры. Кроме того, языки программирования LISP и PROLOG имеют встроенные механизмы для манипулирования знаниями.

Помимо LISP и PROLOG создано множество других языков, ориентированных на обработку символьной информации

и разработку ЭС: SMALLTALK, FRL, INTERLISP и т.д. Кроме специализированных, для разработки экспертных систем используются и обычные языки программирования общего назначения: C, ASSEMBLER, PASKAL, FORTRAN, BASIC и др.

Общими недостатками языков программирования, как единственного инструментального средства для создания экспертных систем, являются:

- высокая трудоемкость разработки системы;
- необходимость наличия высокой квалификации программистов;
- трудности с внесением изменений в готовую систему.

Все это делает применение языков программирования в качестве инструментального средства для реализации ЭС весьма дорогостоящим и трудоемким.

Использование ИС второго типа, а именно сред программирования, дает разработчику возможность не программировать некоторые или все компоненты ЭС, а выбирать их из заранее составленного набора.

Средства этой категории включают несколько программных модулей, что позволяет пользователю комбинировать в процессе разработки экспертной системы разные стили программирования. Среди первых проектов такого рода – исследовательская программа LOOP, допускавшая использование двух типов представления знаний: базирующегося на системе правил и объектно-ориентированного. На основе этой архитектуры во второй половине 1980-х годов было разработано несколько коммерческих программных продуктов, из которых наибольшую известность получили KEE, KnowledgeCraft и ART. Данные программы предоставили в распоряжение квалифицированного пользователя множество опций и для последующих разработок, та-



ких как KAPPA и CLIPS, стали своего рода стандартом. Однако освоить эти языки программистам так же непросто, как языки, отнесенные к предыдущей категории [2].

При применении оболочек ЭС специалист полностью освобождается от создания программ и занимается лишь наполнением базы знаний, поэтому с точки зрения разработчика экспертных систем их использование представляет наибольший интерес.

Типичным представителем этой группы инструментальных средств является пакет EXSYS Professional 5.0 for Windows (разработчик – компания MultiLogic Inc., США) и его последующая

модификация – пакет EXSYS Developer 8.0, предназначенный для создания прикладных экспертных систем в различных предметных областях. Система построена на использовании сложных правил вида ЕСЛИ–ТО–ИНАЧЕ. Для выбора стратегии получения заключения в системе по умолчанию используется обратная цепочка вывода. Прямая цепочка может быть задана при настройке системы. Система обладает развитым графическим интерфейсом, способна обращаться к внешним базам данных, проверять правила на непротиворечивость. При определенной настройке может работать с русскоязычными текстами [3].

Оболочки экспертных систем

Тип программ, которые называются оболочкой экспертной системы, создавался с целью позволить различным специалистам по знаниям воспользоваться результатами работы команд инженеров и программистов, решавших аналогичные задачи.

К сожалению, уже сейчас можно сделать вывод о том, что большинство коммерческих продуктов типа оболочек экспертных систем подходит только для тех проблем, в которых пространство поиска невелико. Как правило, в них применяется метод исчерпывающего поиска с построением обратной цепочки вывода и ограниченными возможностями управления процессом. Но некоторые современные оболочки, как утверждают их разработчики, могут применяться для решения широкого круга задач, поскольку они поддерживают множество функций представления знаний и управления, включая и моделирование прямой цепочки логического вывода, процедуры, передачу сообщений и т.п.

Простота языков представления знаний, применяемых в большинстве оболочек экспертных систем, является, с одной стороны, достоинством, а с другой – недостатком такого рода экспертных систем.

Используемый в оболочках форма-

лизм и недостаточная структурированность набора правил затрудняет разделение разных (эвристических, управляющих, знаний об ожидаемых значениях параметров) и восприятие новых видов знаний, поскольку добавление в базу знаний нового правила требует внесения изменений в различные компоненты экспертной системы.

Еще одно критическое замечание касается не столько конкретной системы, сколько функциональных возможностей систем, базирующихся на правилах, а также и всех оболочек экспертных систем, в которых наборы правил используются в качестве основного языка представления знаний.

Дело в том, что значительная часть экспертных знаний – это знания о типовых случаях, т.е. довольно часто встречающихся в предметной области. Эксперты легко распознают известные типовые случаи и способны без особого труда классифицировать их даже при наличии определенных помех или неполных данных. Они интуитивно различают подходящие случаю или необычные значения исходных данных и принимают адекватное решение о том, как поступить в дальнейшем при решении проблемы. Такие знания очень трудно представить в экспертной системе, если пользоваться только правилами в форме



«условие – действие» [3].

В качестве примера смоделируем следующую ситуацию. При очередном включении в сеть электродвигатель механизма не проворачивает вал и гудит (заклинивание). При этом произошло повышение температуры корпуса электродвигателя. Допустим, электродвигатель механизма, возможно, перегружен. Каким образом ЭС свяжет перегрузку двигателя с его заклиниванием?

Сформулируем задачу в общем виде, т.е. то, что должна определить ЭС [4]. В нашем случае это вероятная причина – перегрузка. Имеет место ситуация (двигатель при пуске не разворачивается и гудит), требуется предсказать ее последствие (повышенный нагрев корпуса двигателя). Итак, прежде всего зафиксировано возникновение определенного состояния (двигатель при пуске не разворачивается и гудит), а затем в работу включаются относящиеся к нему правила:

Правило № 1:

ЕСЛИ двигатель при пуске не разворачивается и гудит, ТО наблюдается повышенный нагрев корпуса двигателя.

Правило № 2:

ЕСЛИ наблюдается повышенный нагрев корпуса двигателя, ТО двигатель перегружен.

Каким образом можно прийти к выводу о том, что перегрузка приведет к заклиниванию двигателя? Используем прямую цепочку рассуждений. Отправной точкой служит возникшая ситуация. Затем срабатывает условная часть (часть ЕСЛИ) первого правила. Поскольку возникшая ситуация удовлетворяет содержащемуся в ней условию, согласно констатирующей части этого правила (части ТО) выводится новая ситуация (наблюдается повышенный нагрев корпуса двигателя). Цепочка рассуждений продолжается. Условие, содержащееся в части ЕСЛИ второго правила, удовлетворяется, если уже сработало первое правило. Следовательно, вывод о перегрузке двигателя можно сделать при возникновении двух ситуаций:

– двигатель при пуске не разворачи-

вается и гудит;

– наблюдается повышенный нагрев корпуса двигателя.

Описанная последовательность рассуждений называется прямой цепочкой потому, что констатирующая часть правила (часть ТО) выполняется только в том случае, если удовлетворяется условная часть правила (часть ЕСЛИ). Отправной точкой рассуждений, таким образом, служит уже возникшая ситуация, а затем делаются выводы.

Существует и обратная цепочка рассуждений. Здесь результат известен, и нужно найти вызвавшие его причины.

Известный результат повлечет за собой цепочку рассуждений, которая приведет нас к вызвавшим его причинам. Причины возникают раньше следствий, поэтому в процессе обратной цепочки рассуждений просматриваются логические выводы и устанавливаются условия, которые к ним привели. Таким образом, определяется, связаны ли эти условия с предыдущими логическими выводами. Например, в приведенной задаче сначала надо обратиться ко второму правилу, поскольку содержащийся в нем логический вывод: «ТО двигатель перегружен» соответствует реально возникшей ситуации. Обратная цепочка рассуждений всегда начинается со следствия (часть ТО правила). Причина, по которой двигатель перегружен, содержится в условной части правила 2: «ЕСЛИ наблюдается повышенный нагрев корпуса двигателя». Рассуждения продолжаются, так как надо выяснить, почему же двигатель нагрелся. Ответ на этот вопрос дает правило 1. В условной части правила записано: «ЕСЛИ двигатель при пуске не разворачивается и гудит». Если эти условия выполняются, то, продолжив цепочку, можно выявить причину, по которой двигатель перегружен.

В то же время причинами заклинивания двигателя и нагрева его корпуса могут быть также: отсутствие напряжения в одной из фаз, низкое напряжение, межвитковое замыкание в обмотке статора и т.д. Поэтому придется создать и проверить



другие правила, относящиеся к данной ситуации, проследить еще и другие цепочки, что приведет к значительному усложнению логической модели ЭС. При этом может возникнуть ситуация, когда в правилах, относящихся к проблемной области, не удастся найти условную часть с выполняющимися условиями. Тогда возникнет необходимость обратиться к экспертам или запросить дополнительную информацию, что снизит эффективность самой ЭС.

В оболочках экспертных систем существует также проблема с реализацией механизма обработки неопределенности. Некоторые оболочки уже включают в себя определенный формальный механизм работы с неопределенностью, например MYCIN, основанный на использовании условной вероятности [5].

Условная вероятность – это вероятность наступления какого-то события s при условии, что уже наступило какое-то другое событие e . Вероятность наступления двух событий вычисляется следующим образом:

$$P(e/s) = P(s/e) * P(e). \quad (1)$$

Методика создания новой экспертной системы

Создание и использование экспертных систем является одним из концептуальных этапов развития современных информационных технологий. Процесс разработки экспертных систем имеет существенные отличия от разработки других программных продуктов, поскольку в основе интеллектуального решения проблем в некоторой предметной области лежит принцип воспроизведения знаний опытных специалистов – экспертов.

В литературе приведено несколько подходов к созданию ЭС [6]. Более привлекательными и конструктивными выглядят три подхода:

- по эволюции решаемых задач;
- по набору основных компонент (информационно программных изделий);
- по экспериментально пополняемой базе формализованных уникальных знаний экспертов.

То есть вероятность того, что произойдут два события, e и s , причем e произойдет первым, равна вероятности наступления события s , если известно, что произошло событие e , умноженной на вероятность появления события e .

В экспертных системах используется еще одно уравнение условной вероятности:

$$P(s) = P(s/e) * P(e) + P(s/NOTe) * P(NTe). \quad (2)$$

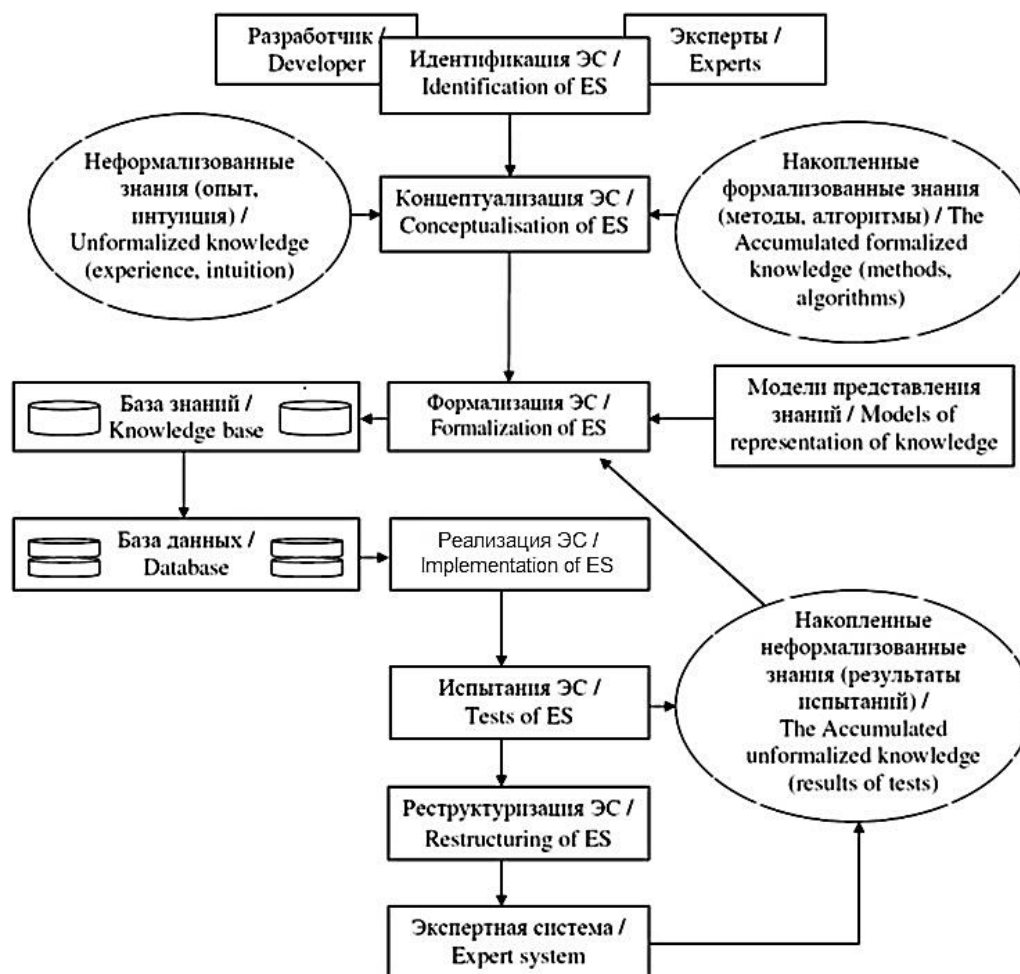
Вероятность появления события s , $P(s)$ – равняется вероятности появления события s при условии появления события e , $P(s/e)$, умноженной на вероятность появления события $P(e)$, плюс вероятность появления события s при условии, что событие e не произошло, $P(s/NOTe)$, умноженная на вероятность, что событие e не произошло, $P(NTe)$.

Очевидно, что использованные в оболочках экспертных систем механизмы такого рода не всегда согласуются с выводами теории вероятностей и обладают свойствами, которые с трудом поддаются анализу.

Процесс создания ЭС разделяют на шесть основных этапов: *идентификации, концептуализации, формализации, реализации, испытаний и реструктуризации* (см. рисунок).

Эти этапы не являются четко очерченными и детально проработанными. Они лишь приблизительно описывают процесс создания, который в каждом из конкретных примеров может иметь различный вид.

На первом этапе идентифицируем создаваемую экспертную систему. Экспертные системы, как любой сложный объект, структурируются по некой совокупности признаков. Современные ЭС структурируются: по решаемой задаче; по связи с реальным временем; по степени интеграции; по способу использования знаний; по поколению ЭС; по классам ЭС; по стадии разработки и т.д.



Методика создания экспертной системы
Expert system development procedure

Вновь создаваемую экспертную систему имеет смысл *идентифицировать* по решаемой задаче:

– **ЭС интерпретации данных.** В эту категорию включаются ЭС, ориентированные на распознавание каких-либо образов, понимание речи, анализ изображений, идентификацию сигналов и другие аналитические задачи.

– **ЭС мониторинга.** Экспертные системы данного типа ориентированы на непрерывную интерпретацию данных в реальном масштабе времени и сигнализацию о выходе параметров за допустимые пределы. Экспертные системы мониторинга являются предупредительными. Разрабатываются для атомных электростанций, воздушного движения, регулирования и управления финансами.

– **ЭС прогнозирования.** Способны

давать вероятностные оценки задаваемых пользователем ситуаций. Эти системы используются при решении таких задач, как прогноз погоды, демографические прогнозы, оценки будущего урожая, прогнозы в военной области, а также прогнозирование кадрового потенциала фирмы на определенный период времени.

– **ЭС диагностики.** Выполняют процессы классификации объекта к некоторым системам и обнаружения неисправностей в них. Неисправностью в данном случае считается любое отклонение от нормы. Такая трактовка позволяет с единых теоретических позиций рассматривать и неисправности оборудования в технических системах, и заболевания живых организмов, и природные аномалии. ЭС делает выводы о нарушениях в работе каких-либо объектов по данным наблюдений за ними. Такие си-



системы известны в медицине, при анализе электронных, радиотехнических и других схем, а также при анализе работы различных механических устройств и систем программного обеспечения.

– **ЭС проектирования.** Подобные ЭС готовят спецификации на создание объектов с заранее заданными свойствами. Под спецификацией понимается весь набор необходимых технических графических и текстовых документов. Выделяют: компоновку электронных схем, проектирование зданий и составление бюджета. Для этих задач характерен принцип многовариантного решения, т.е. варьируя налагаемые ограничения и возможные варианты исполнения, проектируется такая конструкция, которая будет удовлетворять заданным ограничениям с наименьшими затратами. Затраты здесь выступают в роли целевой функции. Таким образом, в системах данного типа реализуется принцип целенаправленного поведения.

– **ЭС отладки.** Системы этого типа не принято считать полностью экспертными. Они обобщают в себе элементы планирования, проектирования и прогнозирования, т.е. в них выдаются рекомендации по исправлению обнаруженных затруднений в процессе функционирования объектов. К таким ЭС относятся, например, машинные системы отладки программ для компьютера.

– **ЭС ремонта.** В системах этого типа формируются и выполняются планы устранения обнаруженных нарушений в работе определенных объектов. Применяются в автомобильной промышленности, при эксплуатации инженерных сетей, в авиации, для обеспечения работы аппаратной части компьютеров.

– **ЭС планирования.** К этим системам относятся: автоматическое программирование, планирование, поведение робота, составление маршрута, планирование коммуникаций, планирование проведения какого-либо эксперимента, планирование в экономической области, например, ресурсов, а также планирование в военной области.

– **ЭС обучения.** Эти системы констатируют и отлаживают знания ученика. В таких системах создается некая модель знаний ученика. Фактические знания сравниваются с существующей моделью, затем ЭС диагностирует слабости в познаниях ученика и находит соответствующие средства для их ликвидации. Экспертные системы такого рода могут использоваться при проведении мероприятий по обучению персонала.

– **ЭС управления.** Системы этого типа можно назвать интегрированными, поскольку они объединяют в себе элементы всех рассмотренных выше систем. С их помощью решаются задачи управления транснациональными компаниями, воздушным транспортом, деловой активностью, боевыми действиями.

Следующий этап – *концептуализация*, в ходе которой выявляются основные понятия, отношения и характер информационных потоков для описания процесса решения задач в определенной предметной области. Происходит выявление подзадач, стратегий и ограничений.

При *формализации* происходит отображение множества понятий и отношений в абстрактные элементы формальных моделей знаний. При формализации знаний используются, как правило, искусственные языковые средства, например, пустые оболочки ЭС.

Существует несколько моделей представления знаний, из которых можно выделить четыре основные: логические исчисления, фреймы, семантические сети и продукционные системы [7].

На сегодняшний день стержневым подходом к работе с данными, структурированными при помощи классов в объекты, является процедурный подход на основе продукционных правил. Экспертные системы, в общем случае, работают полным перебором графа всевозможных состояний предоставленных системе данных при помощи последовательного применения продукционных правил и, таким образом, выработывают решение самостоятельно, либо доказывают, что задача неразрешима на



текущем наборе знаний. Тем не менее, при рассмотрении даже относительно простых задач полный перебор зачастую оказывается неприемлем в силу его трудоемкости, поэтому базовыми понятиями программирования на основе продукционных правил являются также понятия механизмов исключений и возврата.

Исключения – это, по сути, программное отображение эвристик известных разработчику системы и позволяющих отсеять заведомо ложные пути на графе возможных решений задачи. В случае, когда система попадает в такое состояние, происходит возврат к ее предыдущему состоянию при помощи механизма возврата: система полностью восстанавливает свои данные и позицию их обработчика за одним исключением – продукционное правило, приведшее систему к исключению, никогда более не применяется к аналогичному набору знаний в системе.

Однако при использовании этого способа разработки ЭС может возникнуть проблема несоответствия управляющих стратегий, вложенных в процедуры вывода базовой системы. Кроме того, принятый язык представления знаний может не подходить для данного приложения. Все это затрудняет выбор подходящей оболочки ЭС и ее применение. Уже в процессе создания прикладной системы иногда выясняется, что возможности, заложенные в используемом инструментальном средстве, не позволяют реализовать необходимые процедуры вывода и представление предметных знаний, требующиеся для успешной работы.

В ходе *реализации* разработчик ЭС комбинирует и реорганизует формализованные знания, добиваясь их совместимости с характером информационных потоков задачи. Множество результирующих правил и соответствующих управляющих структур определяют формализованные знания, которые можно предъявить для контрольных испытаний.

В ходе *испытаний* производится оценка предъявленных знаний и их просмотр с целью приведения в соответствие

с принятым стандартом высокого качества функционирования. Он определяется специалистами, работающими в данной предметной области. По результатам оценки качества знаний возможна их модификация.

Реструктуризация знаний производится: в связи с появлением новых задач и соответствующих предметных областей; новых экспертов, обладающих другими специфическими знаниями; новых тестовых примеров, позволяющих выявить несоответствие знаний требованиям качества решения задач и др.

Реструктуризация знаний практически всегда увеличивает объем базы знаний, что приводит к изменениям в худшую сторону характеристик процессов взаимодействия пользователей с ЭС, в первую очередь быстродействия. В результате потребуется переосмысление накопленных в системе знаний. Возможно, что в процессе этого могут быть удалены неактуальные знания, факты и рассуждения, не приводящие к положительному решению задач, а также добавлены новые факты или правильные рассуждения.

Информационное обеспечение экспертной системы складывается из трех компонент: базы данных, базы целей и базы знаний.

База данных содержит структурированные данные, обеспечивает интегрированное представление и многоцелевое использование хранимых данных, однократный ввод и редактирование данных, их многократное использование, санкционированный доступ к данным пользовательских программ.

База целей содержит информацию о целевом поведении предметной области, которая определяет поведение самой системы и побуждает ее к действию.

База знаний, в которой представляются знания о конкретной предметной области, является основой экспертной системы, она накапливается в процессе ее построения. Знания выражаются в реальном виде, позволяющим сделать явным способ мышления и решения задач, и организова-



ны так, чтобы упростить принятие решений.

База знаний отражает возможность использования высококачественного опыта на уровне мышления квалифицированных специалистов, что делает экспертную систему рентабельной в соответствии с нуждами бизнеса и заказчика. База знаний, обуславливающая компетентность экспертной системы, воплощает в себе знания специалистов учреждения, отдела, опыт группы специалистов и представляет собой институциональные знания (свод квалифицированных, обновляющихся стратегий, методов, решений).

Знания от эксперта посредством модуля приобретения знаний поступают в базу знаний, которая тесно связана с базой целей. База данных (БД) формируется в

процессе первоначального общения пользователя с системой. Именно для информации, составляющей эту БД, будет осуществляться поиск решения проблемы путем привлечения к работе модуля механизма логических выводов. Результат работы ЭС выдается пользователю в понятной и удобной форме.

Стоит отметить, что по сравнению с первыми разработками современные оболочки экспертных систем более гибкие, по крайней мере, в том, что без особого труда могут быть интегрированы в большинство операционных систем, доступных на рынке программного обеспечения, и оснащены достаточно развитыми средствами пользовательского интерфейса.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Создание ЭС с использованием языков и сред программирования зачастую является трудоемкой и дорогостоящей задачей, кроме того требует знания основ программирования. Поэтому применение этого способа целесообразно только в случае создания ЭС, не требующих внесения изменений в готовую систему.

2. В случае применения оболочек, процесс создания ЭС оказывается вполне оправданным и удобным. Например, возможность для разработчика производить небольшие, вполне адекватные экспертные системы за короткие сроки.

3. Одним из наиболее важных последствий разработки экспертных систем является модификация знаний и развитие ЭС в интеллектуальные. Перспектива развития состоит в слиянии концепций оборудования, средств их создания (языков,

оболочек) и самих экспертных систем.

4. Искусственная компетентность экспертных систем не заменяет полностью человека. Эксперт - человек способен реорганизовать информацию и знания и использовать их для синтеза новых знаний.

5. Экспертные системы менее приспособлены к обучению на уровне новых концепций и новых правил. Бывает, что они оказываются неэффективны и малоприспособлены в тех случаях, когда надо учитывать всю сложность реальных задач.

Однако, несмотря на все недостатки, область применения экспертных систем расширяется. Интеллектуальные системы уже разрабатываются и внедряются как за рубежом, так и в России для коммерческого использования. Зарубежный опыт показывает, что экспертные системы разрабатываются в основном в университетах, научно-исследовательских центрах и коммерческих организациях, в том числе и для финансовой индустрии.

Библиографический список

1. Илющенко В.В., Балканов В.А., Сеньков И.В. Анализ инструментальных средств разработки экспертных систем // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в усло-

виях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 21–25 апреля 2015 г.). Иркутск, 2015. Т. 1. С. 139–143.



2. Экспертные системы. Инструментальные средства экспертных систем [Электронный ресурс]. URL: http://expertsistem.ucoz.ru/index/instrumentalnye_sredstva_ekspertnykh_sistem/0-14 (21.11.2017).
3. Оболочки экспертных систем [Электронный ресурс]. URL: <http://tpl-it.wikispaces.com> (21.11.2017).
4. Дунаев М.П. Экспертные системы для электроприводов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. 128 с.
5. Frank Puppe. Einfuehrung in Expertsystemen. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1991. 143 p.

6. Филиппович Ю.Н., Филиппович А.Ю. Экспертные системы. Сер. кн. «Системы искусственного интеллекта». Кн. 2. М.: Наука, 2003. 289 с.
7. Илющенко В.В., Карлов Р.В., Карлова Л.Н. Методика создания экспертных систем // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 24–28 апреля 2017 г.). Иркутск, 2017. Т. 1. С. 47–52.

References

1. Ilyushchenko V.V., Balkanov V.A., Sen'kov I.V. *Analiz instrumental'nykh sredstv razrabotki ekspertnykh system* [Analysis of tools of expert system development]. *Materialy Vserossiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Povyschenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya elektroenergii v usloviyah Sibiri"* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Increasing efficiency of electrical energy production and use in Siberia"]. Irkutsk, 2015, part I, pp. 139–143. (In Russian).
2. *Expertnye sistemy. Instrumental'nye sredstva sistem* [Expert systems. System expert tools]. Available at: http://expertsistem.ucoz.ru/index/instrumentalnye_sredstva_ekspertnykh_sistem/0-14 (accessed 21 November 2017).
3. *Obolochki ekspertnykh system* [Expert system shells]. Available at: <http://tpl-it.wikispaces.com> (accessed 21 November 2017).
4. Dunaev M.P. *Expertnye sistemy dlya elektropri-*

- odov* [Expert systems for electric drives]. Irkutsk, IRGTU Publ., 2011, 128 p. (In Russian).
5. Frank Puppe. Einfuehrung in Expertsystemen. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1991. 143 p.
6. Philipovich U.N., Philipovich A.U. *Expertnye sistemy. Seriya knig "Sistemy isskustvennogo intellekta"* [Expert systems. A series of books "Systems of artificial intelligence"]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 289 p. (In Russian).
7. Ilyushchenko V.V., Karlov R.V., Karlova L.N. *Metodika sozdaniya ekspertnykh sistem* [Methods of expert system development]. *Materialy Vserossiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Povyschenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya elektroenergii v usloviyah Sibiri"* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Increasing efficiency of electrical energy production and use in Siberia"], Irkutsk, 2017, p. I, pp. 47–52. (In Russian).

Критерии авторства

Илющенко В.В. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат

Authorship criteria

Ilyushchenko V.V. has copyrights for this article 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.233.5

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-67-74>

СТРУКТУРНЫЕ ФУНКЦИИ В ГЕНЕРИРОВАНИИ БИНАРНОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕСТАНОВОЧНЫМИ МЕТОДАМИ

© А.В. Петров¹

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Нахождение новых и модернизация известных методов генерирования случайных процессов с заданными статическими (закон распределения вероятностей) и динамическими (корреляционная и структурная функции) 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 задаваемым 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. Рассмотрены характеристики, отражающие вероятностные зависимости в генерируемых реализациях случайных процессов. Изучены структурные функции бинарного процесса, генерируемого посредством перестановочной процедуры. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведение исследований позволило расширить возможности оценивания вероятностных зависимостей за счет использования структурных функций. Этот инструмент оценивания зависимостей обладает более широкими индикативными свойствами, состоящими в возможности выявления случайных процессов со стационарными приращениями.

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

Информация о статье. Дата поступления 18 января 2018 г.; дата принятия к печати 24 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Петров А.В. Структурные функции в генерировании бинарного случайного процесса перестановочными методами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 67–74. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-67-74

STRUCTURAL FUNCTIONS IN BINARY RANDOM PROCESS GENERATION BY PERMUTATION METHODS

A.V. Petrov

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

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is search for new and modernization of known methods for generating random processes with given static (probability distribution law) and dynamic (correlation and structure functions) probabilistic properties. **METHODS.** The main research methods are the methods of probability theory, mathematical statistics and numerical methods. **RESULTS.** The object of the study is a permutation technology for generating random processes with simultaneously set probability distribution law and autocorrelation function. This technology is simple in software implementation, has high speed and allows to enter required probability properties with the accuracy of their reflection sufficient for engineering application (for example, in simulation modeling). The Bernoulli (binary) law has been taken as a law of generated process probability distribution. The characteristics reflecting probabilistic dependencies in generated implementations of random processes have been considered. The structural functions of the binary process generated by a permutation procedure have been studied. **CONCLUSION.** The conducted research allowed to expand the possibilities of probabilistic dependency estimation due to the use of structural functions. This dependency estimation tool has broader indicative properties as it is able to identify random processes with stationary increments.

Keywords: random processes, generation, law of probability distribution, autocorrelation dependence, structural functions, permutation technology.

Article info. Received January 18, 2018; accepted January 24, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Petrov A.V. Structural functions in binary random process generation by permutation methods. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 67–74. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-67-74

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



Введение

Одной из ключевых задач как теоретических, так и практических исследований является нахождение зависимостей между процессами, параметрами и явлениями. Наилучшим обоснованно считается получение количественных описаний зависимостей и стремление найти математическую форму этих описаний.

Известны два вида зависимостей – функциональная (детерминированная) и стохастическая. Функциональная зависимость является ключевым понятием математического анализа.

Стохастическая (вероятностная) зависимость устанавливает соответствие между конкретным значением величины X и множеством значений величины Y , причем последняя (Y) принимает значения с определенной вероятностью.

Этот вид зависимости говорит о соответствии (прямом или противоположном) между ТЕНДЕНЦИЯМИ проявлений X и Y . Проявление стохастической зависимости происходит «в среднем». Пределы стохастической зависимости – функциональная зависимость и независимость. Между этими крайностями лежат все остальные разновидности стохастической зависимости.

Как отмечалось в [7], допустимо говорить о том, что функциональная зависимость является в существенной степени идеализацией. Объясняется это объективной необходимостью введения условий и ограничений на компоненты и сами функции, функционалы, операторы с тем, чтобы нивелировать неизбежные погрешности измерений и изменения внешних условий и помех. Это обусловлено невозможностью (без использования вероятностных понятий) дать характеристику влиянию этих внешних воздействий. Отсюда ясно, что, несмотря на все сложности применения и описания стохастических зависимостей, они являются более близкими к «правде».

Известен [2] набор требований к любым числовым характеристикам:

- они должны представлять собой

величины, зависящие от функционирования системы, которые, по возможности, просто вычисляются, исходя из математического описания системы;

- они должны давать наглядное представление об одном из свойств системы;

- они должны допускать (в пределах возможного) приближенную оценку по экспериментальным данным.

Принципиально важным в этом списке является второе требование. Отрицательным примером пока еще неисполнения этих требований служат начальные, центральные и смешанные моменты теории вероятностей. При этом порядки моментов ограничиваются только целочисленностью и неотрицательностью. (Повидимому, ранее просто не задумывались о снятии этих ограничений.) Для начальных моментов известно физическое толкование лишь момента первого порядка – математического ожидания. Для центральных моментов второе требование выполняется для порядков 2, 3 и 4. Для смешанных центральных моментов порядка 1,1 – корреляционный момент.

Моменты как числовые вероятностные характеристики, вычисляемые для одной случайной величины, могут быть названы статическими характеристиками, так как они отражают свойства отдельно взятого случайного объекта. Когда речь идет о моментах, распространенных на две и большее число случайных величин, то дополнительно вводят характеристики стохастической связи, и потому (в определенной мере) динамических характеристик. Отличительной чертой этого множества объектов является их разделение: качественные и количественные. К первым отнесем регрессию, обеспечивающую определение характера связи, – линейную и нелинейную. Вторые (например, корреляционный момент) оценивают тесноту связи в количественной форме.



Классификация характеристик вероятностных взаимосвязей

В основу классификации положены определяющие способы исчисления вероятностных характеристик взаимосвязи:

- усреднение произведений;
- усреднение разностей;
- условные характеристики;
- другие.

Каждый класс, в свою очередь, разбивается на подклассы:

- автохарактеристики;
- взаимные характеристики.

Каждый подкласс также разобьем на составляющие:

- основные;
- производные – характеристики, получаемые из основных посредством тех или иных математических преобразований.

И, наконец, последней градацией будет разделение на числовые и функциональные вероятностные характеристики взаимосвязи случайных объектов.

Исследуемые нами вероятностные характеристики, отражающие взаимосвязи между случайными объектами, представляют собой математическое описание взаимодействия двух (или большего числа) случайных величин. Это описание выражается в виде усредненных в вероятностном смысле арифметических операций над случайными величинами или некоторыми функциями над ними.

Из этого перечня выпадают две операции – сложение и деление. Первая – по причине того, что математическое ожидание суммы случайных величин равно сумме математических ожиданий и, следовательно, не позволяет оценить степень вероятностной взаимосвязи. Вторая – по причине возможного деления на ноль. Усредненная разность носит название структурной, а усредненное произведение – корреляционной функции.

Приведем список вероятностных характеристик взаимосвязей [5]:

- корреляционный момент;
- коэффициент корреляции;
- автокорреляционная функция;
- нормированная автокорреляци-

онная функция;

- взаимный корреляционный момент;
- коэффициент взаимной корреляции;
- взаимная корреляционная функция;
- нормированная взаимная корреляционная функция;
- частный коэффициент корреляции;
- множественный коэффициент корреляции;
- моментная функция;
- взаимная моментная функция;
- интервал корреляции;
- функция регрессии;
- ранговый коэффициент корреляции Спирмэна;
- ранговый коэффициент корреляции Кендалла;
- спектральная функция (плотность);
- взаимная спектральная функция (плотность);
- структурная функция;
- функция когерентности;
- условная дисперсия (скедастическая функция);
- условная функция распределения вероятностей;
- условная плотность распределения вероятностей;
- корреляционные отношения;
- коэффициент коллигации;
- функция коллигации.

Далее рассматриваются моментные, автокорреляционные и соответствующие структурные функции при условии стационарности в широком смысле случайного процесса $\{X(t), t \in T\}$, $T = \{0, 1, \dots\}$.

Моментной функцией называется момент вида.

$$B_{X}^{(i,j)}(t', t'') = M \{X^i(t') \cdot X^j(t'')\}$$

или в центрированной форме



$$B_X^{(i,j)}(t', t'') = \\ = M \left\{ \left[X(t') - m_{X(t')} \right]^i \cdot \left[X(t'') - m_{X(t'')} \right]^j \right\}.$$

Для стационарного в широком смысле случайного процесса $\{X(t), t \in T\}$, $T = \{0, 1, \dots\}$ центрированная моментная функция имеет вид

$$B_X^{(i,j)}(\tau) = \\ = M \left\{ \left[X(t) - m_X \right]^i \cdot \left[X(t + \tau) - m_X \right]^j \right\}.$$

Физические свойства, отражаемые моментной функцией, исследованы в [7]. Отметим также, что при $i = j = 1$ моментная функция $B_X^{(1,1)}(t', t'')$ есть корреляционная функция $K_X^{(1,1)}(\tau)$.

Автокорреляционная функция – это корреляционный момент вида

$$K_X^{(1,1)}(\tau) = \\ = M \left\{ \left[X(t) - m_X \right]^1 \cdot \left[X(t + \tau) - m_X \right]^1 \right\},$$

где $\tau = t'' - t'$.

Нормированная автокорреляционная функция – это коэффициент корреляции вида

$$r_X(\tau) = \frac{K_X^{(1,1)}(\tau)}{D_X}.$$

Корреляционные характеристики тщательно рассмотрены во многих источниках с точки зрения теории и практики.

Структурная функция

Идея использования разностей для оценки поведения функций, а в практических применениях разности для оценки погрешностей вычислений не нова [8].

Структурная функция первого порядка отражает величину вероятностной взаимосвязи, определяемую через разности значений случайной величины:

$$D_X^1(\tau) = M \left[(X(t) - X(t - \tau))^2 \right]. \quad (1)$$

Верхний индекс $D_X^1(\tau)$ свидетельствует о том, что для исчисления структурной функции используются первые разности. Самостоятельным и интересным для практики представляется вопрос изучения структурных функций порядка, который больше единицы.

Ясно, что структурная функция связана (при условии стационарности случайного процесса) с корреляционной функцией:

$$D_X^1(\tau) = 2 \cdot \sigma_X^2 \cdot (1 - r_X(\tau)). \quad (2)$$

Из последнего выражения следуют свойства структурной функции первого порядка: $D_X^1(\tau) = D_X^1(-\tau)$ и $D_X^1(0) = 0$.

Но введение понятия структурной функции позволило расширить возможности оценки вероятностных зависимостей и как таковых свойств случайных процессов.

Как правило, при проведении теоретических и прикладных исследований вероятностных объектов вопросам оценивания стационарности в широком смысле и эргодичности не уделяется достаточного внимания. В лучшем случае делается предположение, но вот какого-либо количественного доказательства не приводится. А обоснованность предположения о стационарности или (тем более) эргодичности случайного процесса определяет правильность выбора вероятностно-статистического инструментария для исследования.

Существуют специальные статистические процедуры проведения такой проверки [1, 6]. Но они требуют определенных объемов статистических вычислений и проверок гипотез.



Если же при изучении какого-либо случайного процесса отсутствует уверенность в его стационарности, то это не всегда является свидетельством необходимости исследовать этот процесс в рамках теории нестационарных случайных процессов.

Существуют так называемые случайные процессы со стационарными приращениями. По большому счету это нестационарные процессы, но они включают стационарные процессы в качестве частного случая. Описание такого рода процессов были впервые даны А.Н. Колмогоровым [4].

Ключевым свойством структурной функции, которое можно и необходимо использовать для анализа стационарности (или нестационарности) случайного процесса, является поведение этой функции при неограниченном изменении времени.

В [3], например, такая индикаторная роль структурной функции сформулирована следующим образом:

- структурная функция стационарного процесса ограничена и с течением

времени выходит на установившееся значение;

- структурная функция нестационарного процесса с течением времени неограниченно возрастает.

Из определения структурной функции стационарного случайного процесса следует, что она зависит только от расположения значений процесса в реализации τ , а не от текущего момента времени t . Это позволяет утверждать, что структурная функция стационарного случайного процесса при $t \rightarrow \infty$ стремится к установившемуся значению $2 \cdot \sigma_x^2$. Очевидно, что это свойство структурной функции является ключевым в решении вопроса о стационарности процесса. Объясняется это тем, что термин «неограниченно возрастает» менее четок и сложнее доказывается, нежели подтверждение факта стремления структурной функции к конкретному значению – удвоенной дисперсии.

Перестановочная технология генерирования бинарного случайного процесса

В [7–14] 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 не обязательно бинарное, но и произвольное распределение, и требующую автокорреляционную функцию (АКФ). При этом достигается возможность генерирования весьма широкого класса АКФ, имея в виду их форму, а в некоторых случаях и генерирования двумерного бинарного случайного процесса.

Суть перестановочной технологии состоит в организации отбора по некоторому правилу D генерируемого значения из набора претендентов, называемого вектором претендентов $\overline{U}(t)$. В случае генерирования бинарного случайного процесса количество вариантов правил D равно 16 для двумерного вектора претендентов.

Как отмечалось в [7–14], каждое правило D определяется четырьмя функциями вида:

$$\begin{aligned} P\{Y(t) = k_1, u_1(t+1) = \\ = k_2, u_2(t+1) = k_3\} = \\ = P\{Y(t) = k_1, u_1(t+1) = k_2\} \cdot \\ \cdot P\{X(t+1) = k_3\} = \\ = P\{Y(t) = k_1, u_1(t+1) = k_2\} \cdot p_{k_3} = \\ = P_t\{k_1, k_2\} \cdot p_{k_3}, \quad k_1, k_2, k_3 = 0, 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Выражение (3) можно представить в виде четырех функций:

$$\begin{aligned} P_t(0,0) &= f_1[P_{t-1}(k_1, k_2) \cdot p_{k_3}], \\ P_t(0,1) &= f_2[P_{t-1}(k_1, k_2) \cdot p_{k_3}], \\ P_t(1,0) &= f_3[P_{t-1}(k_1, k_2) \cdot p_{k_3}], \\ P_t(1,1) &= f_4[P_{t-1}(k_1, k_2) \cdot p_{k_3}]. \end{aligned} \quad (4)$$



Особенностью такой перестановочной процедуры является идентичность функций f_1 и f_4 во всех 16-ти вариантах правил D. Эти функции всегда зависят только от определенных комбинаций из (4) и не могут выглядеть иначе как

$$\begin{aligned} P_t(0,0) &= (1-p) \cdot P_{t-1}(0,0) + \\ &+ (1-p) \cdot P_{t-1}(1,0), \\ P_t(1,1) &= p \cdot P_{t-1}(0,1) + p \cdot P_{t-1}(1,1), \end{aligned} \quad (5)$$

где $P\{X(t)=1\}=p$;

$$P\{X(t)=0\}=q, \quad p+q=1.$$

Функции f_2 и f_3 формируются всеми возможными комбинациями неисполь-

зованных в (5) элементов:

$$p \cdot P_{t-1}(0,0); (1-p) \cdot P_{t-1}(0,1);$$

$$p \cdot P_{t-1}(1,0); (1-p) \cdot P_{t-1}(1,1).$$

Используя полученные в [7] выражения для автокорреляционных функций компонентов вектора претендентов $\overline{U(t)}$ и выражение (2) – $D_Y^1(\tau) = 2 \cdot \sigma_Y^2 \cdot (1 - r_X(\tau))$ для нахождения структурной функции, найдем для простейшей перестановочной процедуры структурные функции компонентов $\overline{U(t)}$ таблице. Отметим, что $\sigma_Y^2 = p \cdot (1-p)$.

Структурные функции генерируемого процесса $Y(t)$
Structural functions of the generated process $Y(t)$

№ / No.	Структурные функции $D_Y^1(\tau)$ / Structural functions $D_Y^1(\tau)$
1, 2, 4-7, 10, 11, 14, 16	$2 \cdot \sigma_Y^2$
3	$2 \cdot \sigma_Y^2 \cdot \left(1 + p \cdot (1-p) \cdot (x)^{\tau-3} \cdot U_{\tau-3} \left(\frac{1}{2 \cdot x} \right) \right) \Big _{\tau \rightarrow \infty} = 2 \cdot \sigma_Y^2$
8	$2 \cdot \sigma_Y^2 \cdot \left(1 - (-1)^\tau \cdot \frac{(x)^{\tau+1}}{2 \cdot (1-x^2)} \right) \Big _{\tau \rightarrow \infty} = 2 \cdot \sigma_Y^2$
9	$2 \cdot \sigma_Y^2 \cdot \left(1 + \frac{p^\tau \cdot z^{-(\tau-1)}}{2-p} \cdot \left[z \cdot U_{\tau-2} \left(\frac{1}{2 \cdot z} \right) + U_{\tau-3} \left(\frac{1}{2 \cdot z} \right) \right] \right) \Big _{\tau \rightarrow \infty} = 2 \cdot \sigma_Y^2$
12	$\begin{aligned} &2 \cdot \sigma_Y^2 \cdot \left(1 + \frac{1-p}{p \cdot (1-p)} \cdot \sum_{j=0}^{\left[\frac{\tau-2}{2} \right]} (-1)^j \cdot \frac{2 \cdot \tau - 3 \cdot j - 4}{\tau - j - 2} \cdot \left(\frac{\tau - j - 3}{j} \right) \cdot p^{\tau-2} \cdot (1-p)^j \right) = \\ &= 2 \cdot \sigma_Y^2 \cdot \left(1 + \frac{p^{\tau-1} \cdot (1-p)}{(1+p)} \cdot \left[2 \cdot X^{\tau-2} \cdot T_{\tau-2} \left(\frac{1}{2 \cdot X} \right) + X^{\tau-2} \cdot U_{\tau-2} \left(\frac{1}{2 \cdot X} \right) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2 \cdot \sum_{j=0}^{\left[\frac{\tau-2}{2} \right]} (-1)^j \cdot \left(\frac{\tau - j - 1}{j} \right) \cdot X^{2-j} \right] \right) \Big _{\tau \rightarrow \infty} = 2 \cdot \sigma_Y^2 \end{aligned}$
13	$2 \cdot \sigma_Y^2 \cdot \left(1 - (-1)^\tau \cdot \frac{(y)^{2(\tau-1)}}{(1-y^2)} \right) \Big _{\tau \rightarrow \infty} = 2 \cdot \sigma_Y^2$
15	$2 \cdot \sigma_Y^2 \cdot \left(1 - (-1)^\tau \cdot \frac{(y)^{(\tau-1)}}{(1-y^2)} \right) \Big _{\tau \rightarrow \infty} = 2 \cdot \sigma_Y^2$



В таблице использованы следующие обозначения: $x = \sqrt{2 \cdot p \cdot (1-p)}$,
 $y = \sqrt{p \cdot (1-p)}$, $z = \sqrt{\frac{p}{(1-p)}}$, $X = \sqrt{\frac{1-p}{p}}$,
 $\binom{n}{m}$ – биномиальный коэффициент,
 $T_n(\cdot)$ – полином Чебышева 1-го порядка,
 $U_n(\cdot)$ – полином Чебышева 2-го порядка,
 $[\cdot]$ – целая часть числа.

Анализ результатов, отраженных в таблице, показывает, что при $\tau \rightarrow \infty$ структурная функция стремится к установившемуся значению $2 \cdot \sigma_Y^2$. Таким образом, перестановочная процедура генерирования бинарного случайного процесса с двумерным вектором претендентов обеспечивает воспроизведение стационарного случайного процесса.

Выводы

Объектом исследования является перестановочная технология генерирования случайных процессов с одновременно задаваемым 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 изучался бернуллиевский (бинар-

ный) закон. Проведение исследований позволило расширить возможности оценивания вероятностных зависимостей за счет использования структурных функций. Этот инструмент оценивания зависимостей обладает более широкими индикативными свойствами, состоящими в возможности выявления случайных процессов со стационарными приращениями. Применение структурных функций позволило доказать, что генерируемые перестановочной процедурой бинарные случайные процессы являются стационарными.

Библиографический список

1. Петров А.В. Основы теории полиномиальных стохастических взаимосвязей. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 170 с.
2. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. М.: Советское радио, 1973. 439 с.
3. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
4. Петров А.В. Конечные разности как инструмент анализа поликорреляции // Вестник ИРГТУ. 2016. № 5 (112). С. 87–94. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-87-94>
5. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов / Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 464 с.
6. Петров А.В. Моделирование процессов и систем. СПб.: Изд-во «Лань», 2015. 288 с.
7. Карташов В.Я., Новосельцева М.А. Анализ стационарности случайного процесса с помощью модели структурной функции в форме непрерывной дроби // Вестник Томского Государственного Университета. 2002. № 1. С. 55–60.
8. Колмогоров А.Н. Спираль Винера и некоторые другие интересные кривые в гильбертовом пространстве // ДАН СССР 1940. Т. 26. № 1. С. 115–118.
9. Петров А.В. О подходах к вероятностному анализу перестановочных процедур генерирования случайных процессов // Вестник ИРГТУ. 2016. № 2 (109). С. 29–38.
10. Петров А.В. Моментные функции бинарного процесса // Вестник ИРГТУ. 2016. № 9 (116). С. 65–73.
11. Петров А.В. Новые функциональные возможности перестановочной процедуры генерирования бинарного случайного процесса // Вестник ИРГТУ. 2016. Т. 20. № 10. С. 119–127. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-10-119-127>
12. А. с. № 2017610908, Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет вероятностей компонентов перестановочной процедуры / А.В. Петров; правообладатель: федеральное государственное бюд-



жетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»; заявл. 20.09.2016; опубл. 18.01.2017.

13. Петров А.В. К вопросу анализа вероятностных свойств компонентов бинарной перестановочной процедуры // Вестник ИрГТУ. 2016. Т. 20. № 11 (118). С. 102–109. DOI:

<http://dx.doi.org/10.21285/10.21285/1814-3520-2016-11-102-109>

14. Петров А.В. О систематизации вероятностных свойств компонентов бинарной перестановочной процедуры // Вестник ИрГТУ. 2016. Т. 20. № 12 (119). С. 119–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-12-119-128>

References

1. Petrov A.V. Osnovy teorii polinomial'nykh stokhasticheskikh vzaimosvyazei [Fundamentals of the theory of polynomial stochastic relationships]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016. 170 p.
2. Buslenko N.P., Kalashnikov V.V., Kovalenko I.N. Lektsii po teorii slozhnykh system. [Lectures on the theory of complex systems]. Moscow: Soviet Radio Publ., 1973. 439 p. (In Russian)
3. Mirskiy G.J. Kharakteristiki stokhasticheskoy vzaimosvyazi i ikh izmereniya [Characteristics of stochastic relationships and their measurement]. M.: Energoizdat Publ., 1982. 320 p.
4. Petrov A.V. Finite differences as a tool of polycorrelation analysis. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 5 (112), pp. 87–94. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-87-94>
5. Bendat J., Piersol A. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. M.: Mir, 1974. 464 p. (Russ. ed.: Izmereniye i analiz sluchaynykh protsessov. Moscow, Mir Publ., 1974, 464 p.).
6. Petrov A.V. Modelirovaniye protsessov i sistem [Modeling of processes and systems]. St. Petersburg: "Deer" Publ., 2015, 288 p. (In Russian).
7. Kartashov V.Ya., Novoseltseva M.A. Analysis of random process stationarity using the model of a structure function in the form of a continued fraction Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta [Tomsk State University Journal], 2002, no. 1, pp. 55–60. (In Russian).
8. Kolmogorov A.N. Wiener Spiral and some other interesting curves in the Hilbert space. Doklady Akademii nauk SSSR [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1940, vol. 26, no. 1, pp. 115–118. (In Russian).

9. Petrov A.V. On approaches to the probabilistic analysis of permutable procedures of random process generation. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 2 (109), pp. 29–38. (In Russian).
10. Petrov A.V. Momentary functions of a binary process. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 9 (117), pp. 65–73. (In Russian).
11. Petrov A.V. New functionalities of the permutation procedure for binary random process generation. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 10 (117), pp. 119–127. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-10-119-127>
12. Petrov A.V. Vychisleniye veroyatnostey komponentov protsedury perestanovok [Probability calculation of permutation procedure components]. Certificate of authorship, no. 2017610908, 2017.
13. Petrov A.V. On the analysis of probabilistic properties of binary permutation procedure components. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, vol. 20, no. 11 (118), pp. 102–109. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/10.21285/1814-3520-2016-11-102-109>
14. Petrov A.V. On systematization of the probabilistic properties of binary permutation procedure components Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 12 (119), pp. 119–128. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-12-119-128>

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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.942

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-75-83>

НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫГРУЗКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ

© В.В. Побединский¹, В.П. Сиваков²

Уральский государственный лесотехнический университет,

Российская Федерация, 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37.

АННОТАЦИЯ. АКТУАЛЬНОСТЬ. В оборудовании целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) одной из важнейших установок является бункер для технологической щепы. От эффективного использования бункера зависит работа всего производства. Главным параметром при проектировании бункера является скорость его разгрузки, которая зависит от многих параметров и, в первую очередь, от влажности и насыпной плотности. Однако этот вопрос недостаточно изучен из-за отсутствия достаточно корректных методов исследования процесса, что является серьезным препятствием для совершенствования технологий ЦБП. **ЦЕЛЬ.** Получение функциональной зависимости скорости выгрузки технологической щепы из бункера в зависимости от параметров влажности и насыпной плотности щепы на основе нечеткого вывода. **МЕТОДЫ.** Учитывая неопределенность, недостаточность, неточность, нечеткость исходных данных, использовано приложение аппарата теории нечетких множеств – нечеткое моделирование. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Выполнены процедуры содержательной постановки задачи нечеткого моделирования, приведение к нечеткости, разработки базы правил нечеткой продукции. Синтез нечеткой модели результирующей зависимости скорости выгрузки технологической щепы из бункера от параметров влажности и насыпной плотности щепы выполнен средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения Matlab.

ВЫВОДЫ. Предлагаемая функция скорости выгрузки щепы, построенная на основе нечеткого вывода, учитывает основные технологические параметры – влажность и плотность, а сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показывает достаточную адекватность разработанной модели и позволяет рекомендовать ее для использования в практике проектирования оборудования ЦБП.

Ключевые слова: выгрузка технологической щепы, лингвистическая переменная, нечеткая модель, нечеткий вывод, нечеткое моделирование.

Информация о статье. Дата поступления 09 января 2018 г.; дата принятия к печати 20 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Побединский В.В., Сиваков В.П. Нечеткое моделирование процесса выгрузки технологической щепы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 75–83. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-75-83

FUZZY MODELING OF PULPCHIP DISCHARGE

V.V. Pobedinsky, V.P. Sivakov

Ural State Forest Engineering University,

37 Sibirskiy trakt St., Ekaterinburg, 620100, Russian Federation

ABSTRACT. RELEVANCE. Pulpchip hoppers are ones of the most important installations in pulp and paper production (PPP) equipment. The effective use of the hopper is the condition of effective operation of the entire production. The main parameter in the design of the hopper is its discharge rate, which depends on many parameters and, first of all, on humidity and bulk density. However, this issue has not been sufficiently studied due to the lack of sufficiently correct research methods of the process. The latter is a serious handicap to the improvement of pulp and paper technologies. The **PURPOSE** of the paper is to obtain a functional dependence of the pulpchip discharge rate from the hopper depending on the parameters of chip moisture and bulk density on the basis of a fuzzy inference. **METHODS.** Due to the fact that input data are uncertain, insufficient, inaccurate and indeterminate we have used fuzzy modeling as a tool of the theory of fuzzy sets. **RESULTS.** We have performed the procedures of fuzzy modeling problem description, reduction to fuzziness and development of the rule base for fuzzy products. The Fuzzy Logic Toolbox of the Matlab application has been used to synthesize the fuzzy model of the resulting dependence of the pulpchip discharge rate from the hopper on the

¹Побединский Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры сервиса и технической эксплуатации транспортных и технологических машин, e-mail: pobed@e1.ru

Vladimir V. Pobedinsky, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Service and Technical Maintenance of Transport and Technology Machinery, e-mail: smtm@usfeu.ru

²Сиваков Валерий Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики и оборудования целлюлозно-бумажного производства, e-mail: pobed@e1.ru

Valery P. Sivakov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Equipment of Pulp and Paper Production, e-mail: smtm@usfeu.ru



parameters of pulp humidity and bulk density. **CONCLUSIONS.** The proposed fuzzy inference-based function of chip discharge rate takes into account the main technological parameters of humidity and density; comparison of simulation results with experimental data shows sufficient adequacy of the developed model and allow to recommend it to be used in the design practice of pulp and paper production equipment.

Keywords: *pulpchip discharge; linguistic variable; fuzzy model; fuzzy inference; fuzzy modeling*

Article info. Received January 09, 2018; accepted February 20, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Pobedinsky V.V., Sivakov V.P. Fuzzy modeling of pulpchip discharge. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 75–83. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-75-83

Введение

В области изучения технологий целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) используются различные общеизвестные методы экспериментальных и теоретических исследований. Но на сегодня в науке накоплен огромный потенциал знаний, который на базе современных информационных технологий может дать развитие новым методам научных исследований. Опыт последних лет показал, что интенсивное развитие элементной базы компьютерной, микропроцессорной техники, практических приложений математики в различных областях, новых методов моделирования позволяют решать ранее недоступные для практической реализации вопросы обоснования различных конструктивных и технологических параметров оборудования ЦБП. В этом смысле можно привести уже достаточно развитое в мировой практике направление приложений теории нечетких множеств (ТНМ) – нечеткое моделирование, которые позволяют более эффективно решать задачи в условиях неопределенности, недостаточности информации в любых сферах деятельности человека.

Практические приложения алгоритмов нечеткого вывода уже доказали свою эффективность широчайшим спектром их применения, однако в области технологий ЦБП, где они с успехом могут применяться, ТНМ не используется. Основной причиной такого положения можно считать недостаточность исследовательских работ в этой предметной области. При моделировании процессов работы бункера в технологии

ЦБП исследуются различные технологические и конструктивные параметры, зависящие от многих факторов [1, 2]. Для математического описания зависимостей процесса требуется большой объем статистических и экспериментальных данных. Проводимые ранее экспериментальные исследования позволили получить некоторые результаты, однако для статистического анализа их недостаточно. Между тем аппарат теории нечетких множеств и его приложение – нечеткое моделирование позволяют успешно решать в любой отрасли задачи подобного типа³ [3–12, 14–20], что и определило цель настоящей работы, в которой рассмотрен подход к моделированию процесса выгрузки технологической щепы из бункера в оборудовании ЦБП.

Целью настоящих исследований было получение функциональной зависимости скорости выгрузки технологической щепы из бункера в оборудовании ЦБП от технологических и конструктивных параметров на основе аппарата нечеткого моделирования.

Разработка модели предусматривала решение следующих задач.

1. Выполнение содержательной постановки задачи нечеткого моделирования скорости выгрузки технологической щепы.
2. Определение нечетких функций принадлежности для входных и выходных переменных задачи (приведение к нечеткости).
3. Разработка базы правил нечеткой продукции.

³ Климусhev Н.К. Управление запасами лесоматериалов в лесозаготовительном производстве: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. М.: МГУЛ, 2008. 39 с./ Klimushev N.K. Management of timber stocks in logging production: Author's Abstract of the Doctoral dissertation ... in technical sciences: 05.21.01. Moscow: MGUL, 2008. 39 p.



4. Синтез нечеткой модели зависимости скорости выгрузки технологической щепы от входных параметров средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения Matlab.

Выполнение содержательной постановки задачи моделирования диэлектрической проницаемости участка леса. В методике [3, 4] содержательная постановка задачи используется для того, чтобы представить данные об основных параметрах процесса, в данном случае выгрузки щепы, в форме определенных эвристических правил, моделирующих рассматриваемый процесс. В этом случае выполняется описание поведения или состояния объекта и его работу в зависимости от сочетания основных влияющих параметров. В данном случае эта процедура выполняется одновременно с формированием базы основных правил системы нечеткого вывода, а в содержательном описании задачи определены наиболее специфические особенности моделирования скорости выгрузки щепы.

Рассмотрим в первую очередь свойства щепы – влажность, плотность, породу древесины, фракционный состав, конструктивные параметры бункера, которые влияют на величину скорости выгрузки. Предположим, что такие влияющие параметры, как порода древесины, фракционный состав, конструктивные параметры закреплены на одном уровне. В этих условиях зависимость скорости выгрузки V от влажности щепы W обратно пропорциональная, т.к. с увеличением влажности скорость снижается. Иными словами, при минимальной влажности скорость выгрузки при прочих равных условиях будет максимальной и наоборот. Однако нужно учесть, что эта зависимость нелинейная. Вначале диапазона изменения влажности влияние на скорость больше, чем в середине, а с дальнейшим увеличением влажности скорость снижается значительно меньше. Связь параметров скорости и плотности аналогичная, также нелинейная и обратно пропорциональная. Но, как показывают эксперименты, нелинейность будет проявляться больше в конце диапазона изменения плотности и

меньше вначале.

Для дальнейшей постановки задачи необходимо определить нечеткие функции принадлежности и базу правил нечеткой продукции.

Определение нечетких функций принадлежности для входных и выходных переменных задачи (приведение к нечеткости). Все операции в теории нечетких множеств основаны на использовании ключевого понятия – функции принадлежности. Здесь можно выделить два этапа. На первом этапе определяется носитель нечеткого множества или область определения. Этот этап не вызывает затруднений и его результаты можно считать объективно достоверными [5].

На втором этапе определяется форма функции принадлежности. Принятие такой функции, как правило, носит субъективный, творческий характер и в большей степени зависит от физического смысла решаемой задачи. Существуют различные методики выявления вида функции принадлежности из многообразия возможных вариантов [4].

Почти все они основаны на экспертной оценке, иногда представляющей довольно сложные процедуры. В данном случае эта проблема также решалась экспертным путем, с учетом физического содержания [1, 2] задачи нечеткого моделирования. Схема процесса выгрузки технологической щепы из бункера приведена на рис. 1 [2]. Выходным параметром является диапазон изменения скорости V м³/мин, выгрузки щепы из бункера. В качестве входных параметров приняты диапазоны изменения влажности W % и насыпной плотности щепы P кг/м³.

Предварительные экспериментальные исследования [1, 2] показали, что величина скорости выгрузки в общем случае изменяется в диапазоне от минимальной, порядка 0–2 м³/мин до 8 м³/мин. В отдельных случаях скорость может достигать 9 м³/мин.

Для влажности щепы преобладающим диапазоном можно принять значения

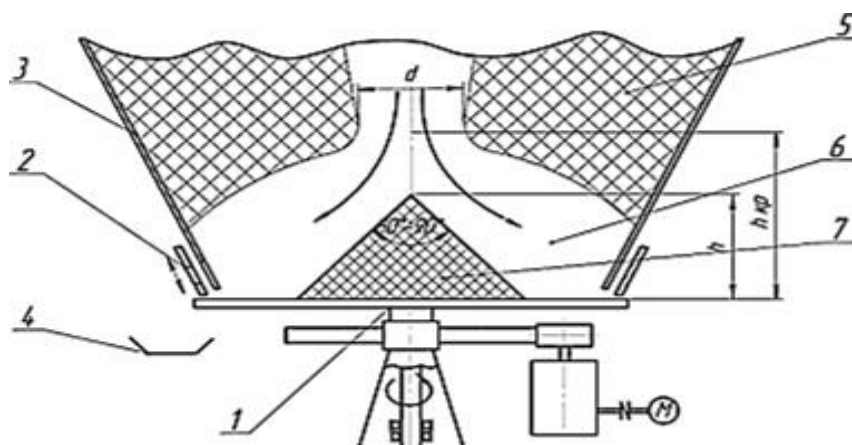


Рис. 1. Схема процесса выгрузки технологической щепы из бункера: 1 – тарельчатый питатель; 2 – загрузочно-разгрузочное устройство; 3 – коническое днище бункера; 4 – приемный лоток; 5 – малоподвижный объем щепы; 6 – подвижный объем щепы; 7 – конус из уплотненной щепы
Fig. 1. Diagram of pulpchip discharge from the hopper: 1 – plate feeder; 2 – charge-discharge unit; 3 – cone bottom of the hopper; 4 – delivery tray; 5 – sluggish volume of chip; 6 – movable volume of chip; 7 – compacted chip cone

от 30 до 80 %. Плотность щепы зависит в первую очередь от породы древесины, а также от влажности и с учетом критических значений плотности можно принять значения от 110 до 330 кг/м³.

Будем полагать, что термножества значений лингвистических переменных представлены треугольными нечеткими числами, а на границах области определения сигмоидальными нечеткими интервалами (рис. 2). Выбор сигмоидальных функций, а не традиционно используемых трапецеидальных, позволяет получить более сглаженную результирующую функцию.

Во многих случаях при решении подобных задач [3, 4] на универсуме нечеткого множества принимают минимальное значение функции принадлежности равное трем, что позволяет ограничиться небольшим объемом базы правил. Но в таких случаях, в зависимости от размерности параметров выходная величина аппроксимируется менее гладкой, ступенчатой функцией. В данном случае будет целесообразно принять пять значений входных и выходной лингвистических переменных.

Для указанных величин предложены лингвистические переменные «Влажность W » и «Плотность P » в виде треугольных нечетких чисел и трапецеидальных интер-

валов (рис. 2) и нечеткая функция лингвистической переменной «Скорость V ».

Здесь параметры задачи изменяются в следующих пределах:

- влажность W от 30 до 80 %;
- плотность P от 110 до 300 кг/м³;
- скорость выгрузки бункера V от 2 до 8 м³/мин.

В качестве обозначений подмножеств лингвистических переменных приняты следующие значения: Мин – минимальный; М – малый; Ср – средний; Б – большой; Мах – максимальный. В терминах теории нечетких множеств лингвистические переменные определены термножествами со следующие значениями:

- «Скорость V » {Мин, М, Ср, Б, Мах};
- «Влажность W » {Мин, М, Ср, Б, Мах};
- «Плотность P » {Мин, М, Ср, Б, Мах}.

В графическом виде нечеткие функции принадлежности для вывода функции $V = f(W, P)$ показаны на рис. 2.

Обоснованные таким образом нечеткие модели функций принадлежности и содержательная постановка задачи могут использоваться для нечеткого вывода модели оценки скорости выгрузки щепы из бункера.

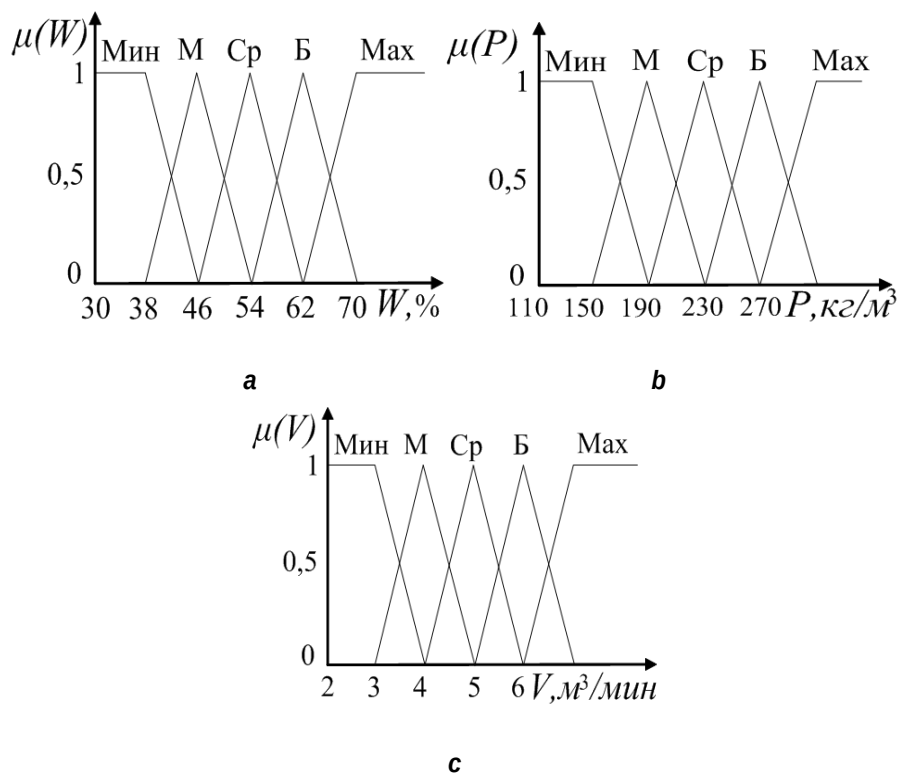


Рис. 2. Нечеткие функции принадлежности лингвистических переменных для нечеткого вывода функции $V = f(W, P)$: а – «Влажность W »; б – «Плотность P »; с – «Скорость V »

Fig. 2. Fuzzy functions of linguistic variable membership for the fuzzy inference of the function $V = f(W, P)$: а – stands for “Humidity W ”; б – indicates “Density P ”; с – “Velocity V ”

Формирование базы правил системы нечеткого вывода. Для нечеткого вывода функции принадлежности используем метод Мамдани [3, 4, 13], что предполагает разработку базы правил нечеткой продукции.

Опишем влияние некоторых сочетаний входных воздействий на выходной параметр.

Если W = «Минимальная» и P = «Минимальная», То V = «Максимальная»;

Если W = «Минимальная» и P = «Малая», То V = «Большая»;

Если W = «Максимальная» и P = «Максимальная», То V = «Минимальная»;

Если W = «Малая» и P = «Минимальная», То V = «Большая»;

Если W = «Средняя» и P = «Минимальная», То V = «Средняя»;

Если W = «Максимальная» и P = «Большая», То V = «Малая».

Используя описание вариантов сочетаний входных параметров (W и P), а также большее количество значений линг-

вистических переменных, например, «Средняя», «Большая», «Малая» и специфических особенностей явления, можно формализовать базу правил нечеткого вывода функции скорости выгрузки щепы. В данном случае база правил сформирована в полном объеме (таблица).

Нечеткий вывод результирующей функции выполнен по методу Мамдани [20]. Схема вывода в Matlab-формате приведена на рис. 3.

Синтез нечеткой модели зависимости скорости выгрузки щепы. Изложенная формальная постановка задачи нечеткого вывода позволяет реализовать ее в специализированных компьютерных программах.

Реализация задачи нечеткого вывода выполнена в среде FIS Editor приложения Matlab [21]. Процедура вывода показана на рис. 4. В данном случае использовался алгоритм по известной [3, 4] методике:



**Состав базы правил нечеткой продукции
для вывода функции принадлежности $V = f(W, P)$
Composition of the rule base of fuzzy products
for the inference of the membership function $V = f(W, P)$**

Значения лингвистической переменной «Влажность W » / Values of the linguistic variable "Humidity W "	Значения выходных нечетких подмножеств «Скорость V », при изменении нечеткой функции «Плотность P » / Values of the output fuzzy subsets "Velocity V " under variation of the fuzzy function "Density P "				
	Мин Min	М	Ср	Б	Мах Max
Мин	Мах	Б	Ср	М	М
М	Б	Ср	Ср	М	М
Ср	Ср	Ср	Ср	Мин	Мин
Б	Б	Ср	Ср	М	Мин
Мах	Б	Б	Ср	М	Мин

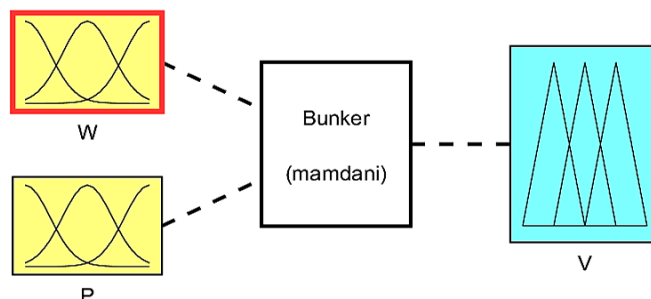


Рис. 3. Схема нечеткого вывода в среде Matlab
Fig. 3. Diagram of the fuzzy inference in the Matlab environment

1. Фаззификация (введение нечеткости), (рис. 4 а, с).
2. Формирование базы правил нечеткой продукции (рис. 4 d).
3. Нечеткий вывод (рис. 4 е).
4. Дефаззификация (приведение к четкости), (рис. 4 е).
5. Получение конечной функции не-

четкого вывода (рис. 4 f).

Полученная в результате нечеткого вывода функция является достаточно корректной математически, что подтверждается практикой проектирования бункеров [21] и может использоваться для прогнозирования технологических параметров процесса выгрузки технологический щепы.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В настоящее время совершенствование методов исследований параметров оборудования ЦБП невозможно без применения интеллектуальных программных систем и компьютерных средств. Предложенная постановка задачи нечеткого моделирования скорости выгрузки щепы и реализация соответствующего программного обеспечения в среде Matlab позволяет

эффективно использовать информационные технологии в исследованиях, моделировании и совершенствовании технологий ЦБП.

2. Разработка модели оценки скорости выгрузки щепы с привлечением статистических методов является чрезвычайно трудоемкой и будет недостаточно корректным подходом. Для условий такого класса задач в наибольшей мере подходит аппарат нечетких множеств.

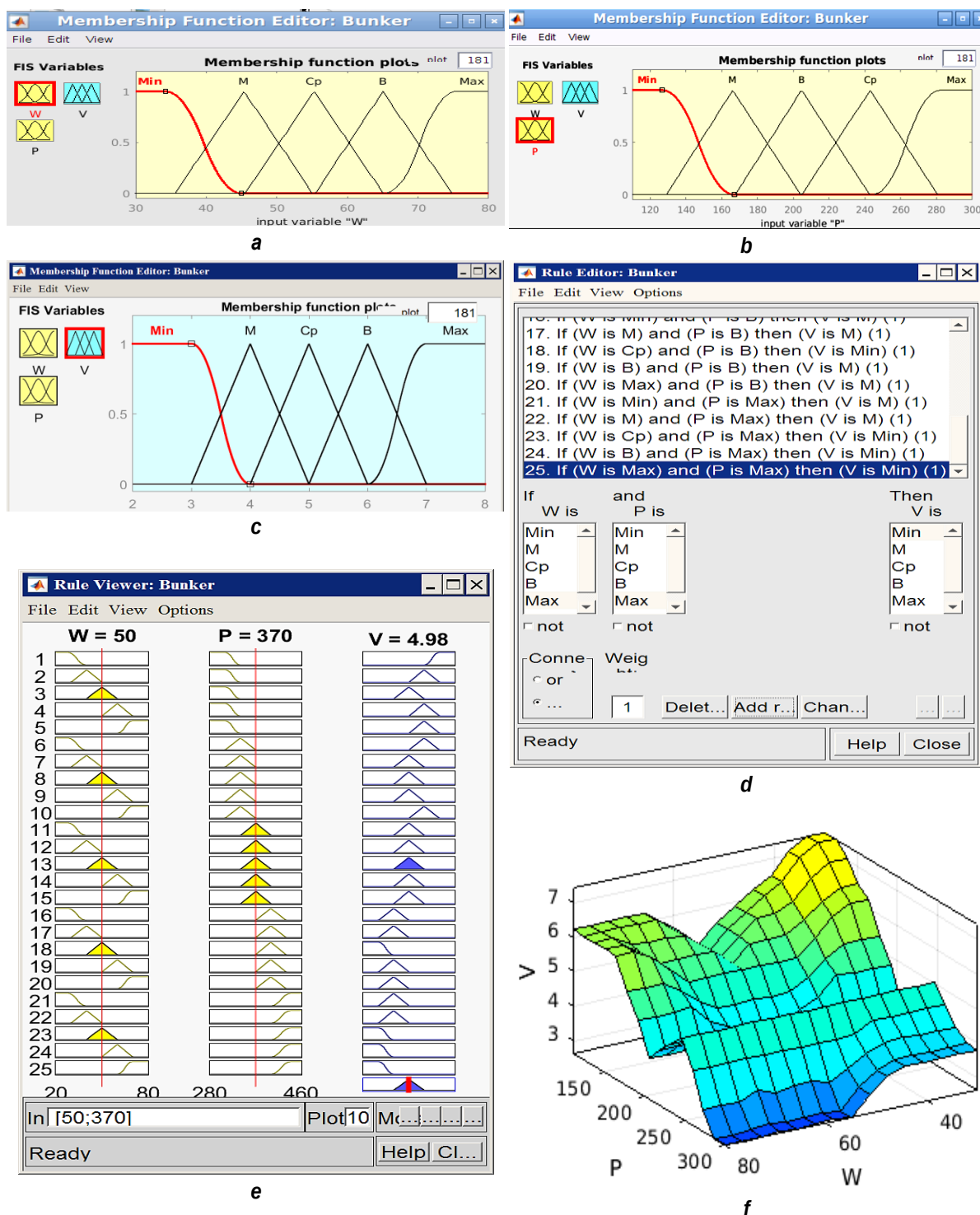


Рис. 4. Нечеткий вывод функции $V = f(W, P)$ в среде Fuzzy Logic Toolbox приложения Matlab:

а – нечеткая функция принадлежности переменной «Влажность W »; б – нечеткая функция принадлежности переменной «Плотность P »; в – нечеткая функция принадлежности лингвистической переменной «Скорость V »; д – база правил нечеткого вывода; е – процедура нечеткого вывода и приведения к четкости; ф – функция нечеткого вывода скорости выгрузки щепы

Fig. 4. Fuzzy inference of the function $V = f(W, P)$ in the Fuzzy Logic Toolbox of the Matlab application:

а – fuzzy membership function of the variable "Humidity W "; б – fuzzy membership function of the variable "Density P "; в – fuzzy membership function of the linguistic variable "Velocity V "; д – rule base of the fuzzy inference; е – procedure of the fuzzy inference and reduction to accuracy; ф – function of the fuzzy inference of chip discharge rate



3. Предлагаемая функция скорости выгрузки щепы, построенная на основе нечеткого вывода, учитывает основные технологические параметры – влажность и плотность, а сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

[1, 2, 21] показывает достаточную адекватность разработанной модели и позволяет рекомендовать ее для использования в практике проектирования оборудования ЦБП.

Библиографический список

1. Голынский М.Ю., Сиваков В.П. Определение давления технологической щепы на днище и стенки бункера // Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум: сборник / ред. А.А. Санникова, Н.В. Кукубиной. Екатеринбург, Уральск, 2009. С. 180–185.
2. Сиваков В.П., Голынский М.Ю. Установка виброрактиватора для обрушения сводов в бункере технологической щепы // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2007. № 8. С. 162–164.
3. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М.: БИНОМ, 2009. 798 с.
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MatLab и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
5. Гринек А.В., Рыбина А.В. Нечеткая модель вывода значения скорости резания на основе данных имитационного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 12 (119). С. 109–118. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-12-109-118>
6. Рубанов В.Г., Титов В.С., Бобырь М.В. Адаптивные системы принятия нечетко-логических решений. Белгород: Белгородский государственный технический университет, 2015. 237 с.
7. Харламенко В.Ю. Формирование согласованного управления рабочими валками обжимной клетки на блюминге на основе системы нечеткого логического вывода Такаги-Сугено-Канга // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 8 (91). С. 17–21.
8. Побединский В.В., Асин К.П., Побединский Е.В. Нечеткое моделирование динамических нагрузок на инструмент роторного окорочного станка // Аграрный научный журнал. 2014. № 12. С. 58–61.
9. Побединский В.В., Асин К.П., Побединский Е.В. Имитационное нечетко-геометрическое моделирование объекта труда окорочных технологий // Аграрный научный журнал. 2015. № 3. С. 56–61.
10. Бахтин А.М., Трошин Г.Е., Побединский В.В. Нечеткое моделирование процесса диагностирования воспаления верхних мочевых путей // Уральский медицинский журнал. 2015. № 1. С. 43–47.
11. Баженов Е.Е., Побединский В.В., Берстенов А.В. Нечеткое управление силовыми потоками в трансмиссии автомобиля // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 10. С. 25–29.
12. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. 143 с.
13. Mamdani E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // IEEE Transactions on Computers. 1977. Vol. 26. No. 12. P. 1182–1191.
14. Mamdani E.H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. International Journal of Man-Machine Studies. 1976. Vol. 8. P. 669–678.
15. Ross T.J. Fuzzy logic with engineering applications. McGraw-Hill, 1995. 600 p.
16. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1985. Vol. 15. No. 1. P. 116–132.
17. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control. 1966. Vol. 8. P. 338–353.
18. Zadeh L.A. The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning // Information Sciences. 1975. Vol. 8. P. 43–80.
19. Zadeh L.A. Fuzzy logic // IEEE Transactions on Computers. 1988. Vol. 21. No. 4. P. 83–93.
20. Сиваков В.П., Голынский М.Ю. Рациональная конструкция бункера щепы // Вестник Казанского государственного технического университета. 2012. № 6. С. 163.
21. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2008a. URL: <http://www.mathworks.com>. (12.11.2017)

References

1. Golynskij M. Ju., Sivakov V.P. *Opredelenie davlenija tehnologicheskoy shhepy na dnishhe i stenki bunkera* [Determination of pulpchip pressure on hopper bottom and walls]. *Vibrodagnostika, tribotekhnika, vibracija i shum: sbornik* [Vibrodiagnostics, tribotechnics, vibration and noise: collection of articles]. A.A. Sannikova, N.V. Kucubinoj. Ekaterinburg, Ural'sk, 2009, pp. 180–185. (In Russian).
2. Sivakov V.P., Golynskij M. Ju. Installation of the vibrator for destruction of arches in the bunker technological chip. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik* [Forestry Bulletin]. 2007, no. 8, pp. 162–164. (In Russian).
3. Pegat A. Fuzzy modeling and control, 2009. 798 p. (Rus. ed.: *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie*. Moscow, BINOM Publ., 2009, 798 p.)



4. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MatLab i fussyTECH* [Fuzzy modeling in MatLab and fussyTECH]. St. Petersburg: BHV-Peterburg Publ., 2005, 736 p. (In Russian).
5. Grinek A.V., Rybina A.V. Fuzzy model of cutting speed value inference based on simulation technique data. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, vol. 20, no. 12 (119), pp. 109–118. (In Russian). <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-12-109-118>
6. Rubanov V.G., Titov V.S., Bobyr' M.V. *Adaptivnye sistemy prinjatija nechetko-logicheskikh reshenij* [Adaptive systems for making fuzzy logic solutions]. Belgorod: Belgorod State Technical University Publ., 2015, 237 p. (In Russian).
7. Harlamenko V.Ju. Formation of coordinated control of break-down stand blooming work rolls based on Takagi-Sugeno-Kang fuzzy logic output system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 8(91), pp. 17–21. (In Russian).
8. Pobedinskij V.V., Asin K.P., Pobedinskij E.V. Fuzzy modeling of the tool loads of the rotor debarker. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal* [The Agrarian Scientific Journal], 2014, no. 12, pp. 58–61. (In Russian).
9. Pobedinskij V.V., Asin K.P., Pobedinskij E.V. Simulation fuzzy and geometric modeling of debarking technologies labor objects. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal* [The Agrarian Scientific Journal], 2015, no. 3, pp. 56–61. (In Russian).
10. Bahtin A.M., Troshin G.E., Pobedinskij V.V. Fuzzy modeling of process of diagnosing inflammation upper urinary tract. *Ural'skij medicinskij zhurnal* [Ural medical journal], 2015, no. 1, pp. 43–47. (In Russian).
11. Bazhenov E.E., Pobedinskij V.V., Berstenev A.V.

- Fuzzy control of power flows in car transmission. *Traktory i sel'hozmashiny* [Tractors and Agricultural Machinery]. 2014, no. 10, pp. 25–29. (In Russian).
12. Uskov A.A., Kuz'min A.V. *Intellektual'nye tehnologii upravleniya. Iskusstvennye neyronnye seti i nechetkaja logika* [Intelligent control technologies. Artificial neural networks and fuzzy logic]. Moscow, Hot Line - Telecom Publ., 2004, 143 p. (In Russian).
13. Mamdani E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 1977, vol. 26, no. 12, pp. 1182–1191.
14. Mamdani E.H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1976, vol. 8, pp. 669–678.
15. Ross T.J. *Fuzzy logic with engineering applications*. McGraw-Hill, 1995, 600 p.
16. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 116–132.
17. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1966, vol. 8, pp. 338–353.
18. Zadeh L.A. The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 1975, vol. 8, pp. 43–80.
19. Zadeh L.A. Fuzzy logic. *IEEE Transactions on Computers*, 1988, vol. 21, no. 4, pp. 83–93.
20. Sivakov V.P., Golynskij M.Ju. Rational design of a pulpchip hopper. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan State Technical University], 2012, no. 6, pp. 163. (In Russian).
21. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2008a. URL: <http://www.mathworks.com>. (12.11.2017)

Критерии авторства

Побединский В.В., Сиваков В.П. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Pobedinsky V.V., Sivakov V.P. 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 618.5.015

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-84-94>

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РОБАСТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

© В.М. Чубич¹, А.Э. Прокофьева²

Новосибирский государственный технический университет,

Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. На основе фильтров Сярккя – Нумменмаа и Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона разработать программно-математическое обеспечение для решения задачи параметрического оценивания моделей стохастических линейных дискретных систем при наличии аномальных наблюдений в измерительных данных. Исследовать робастные процедуры оценивания параметров с целью выявления наиболее эффективной из них.

МЕТОДЫ. Метод квазиправдоподобного оценивания. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** На примере модели системы управления положением двигателя постоянного тока при различном характере расположения аномальных наблюдений показано, что без применения робастных фильтров задача оценивания неизвестных параметров решается плохо. Применение указанных робастных фильтров позволяет повысить качество оценивания как минимум на 1,8% при случайном и на 6,81% при группированном характере расположения аномальных измерений. **ВЫВОДЫ.** Установлено, что робастная процедура оценивания на основе фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона дает наиболее точные оценки параметров.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, робастное оценивание, фильтр Калмана, фильтр Сярккя – Нумменмаа, фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона, стохастическая линейная дискретная система.

Информация о статье. Дата поступления 04 января 2018 г.; дата принятия к печати 08 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Чубич В.М., Прокофьева А.Э. Параметрическая идентификация стохастических линейных дискретных систем на основе робастной фильтрации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 84–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-84-94

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF STOCHASTIC LINEAR DISCRETE SYSTEMS BASED ON ROBUST FILTERING V.M. Chubich, A.E. Prokofieva

Novosibirsk State Technical University,

20, K. Marks pr., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the article is to develop the program software for solving the parametric estimation problem of the models of stochastic linear discrete systems in the presence of outliers in measurement data based on Särkkä – Nummenmaa and Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filters as well as to study robust procedures of parameter estimation in order to identify the most effective of them. **METHODS.** A quasi-likelihood estimation method is used in the study. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** As exemplifies the model of a DC motor control system with different location of outliers, the problem of unknown parameter estimation cannot be solved without the use of robust filter. The application of the robust filters allows to improve the estimation quality by at least 1.8% under random location of outliers and by 6.81% under the grouped one. **CONCLUSIONS.** It is found that the robust estimation procedure based on the Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter provides the most accurate parameter estimates.

Keywords: parametric identification, robust estimation, Kalman filter, Särkkä – Nummenmaa filter, Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter, stochastic linear discrete system

Article info. Received January 04, 2018; accepted February 08, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Chubich V.M., Prokofieva A.E. Parametric identification of stochastic linear discrete systems based on robust filtering. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 84–94. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-84-94

¹Чубич Владимир Михайлович, доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной информатики, e-mail: chubich@ami.nstu.ru

Vladimir M. Chubich, Doctor of technical sciences, Head of the Department of Theoretical and Applied Informatics, e-mail: chubich@ami.nstu.ru

²Прокофьева Алина Эдуардовна, магистрант, e-mail: pae.1994@yandex.ru

Alina E. Prokofieva, Master's Degree student, e-mail: pae.1994@yandex.ru



Введение

Идентификация динамической системы предполагает определение структуры и параметров математической модели, обеспечивающей наилучшее совпадение выходных переменных модели и системы при одинаковых воздействиях. На практике довольно часто экспериментальные данные содержат аномальные наблюдения, что может быть обусловлено отклонением распределения шума измерений от гауссовского. Применение алгоритмов, не принимающих во внимание появление таких наблюдений, может привести к смещению оценок и некорректному решению задачи оценивания.

Традиционно для решения задачи параметрической идентификации стохастических динамических систем используется метод максимального правдоподобия. Это связано с его такими хорошими асимптотическими свойствами как: несмещенность, состоятельность и эффективность [1, 2]. При этом соответствующий критерий идентификации записывается на основе уравнений классического фильтра Калмана и его численно устойчивых модификаций [3–7]. Проблема заключается в том, что, во-первых, фильтр Калмана не является устойчивым к появлению аномальных наблюдений и, во-вторых, большинство работ в области робастного оценивания ориентированы на построение статических моделей регрессионного анализа (см., например, [8, 9]). В связи с этим представляется полезным для теории и практики привлечение наиболее эффективных из многочисленных современных робастных модификаций фильтра Калмана, что позволит качественно решать задачи параметрического оценивания при наличии выбросов.

В [10] уже была предложена процедура робастного оценивания параметров моделей стохастических линейных дискретных систем на основе гибридного фильтра Джао (Jwo) – Чанга (Chung) – Вэнга (Weng) [11]. Проведенный авторами в [12] сравнительный анализ эффективности некоторых современных робастных фильтров показал, что указанный фильтр уступает фильтрам Сярккя (Särkkä) – Нумменмаа (Nummenmaa) [13] и Изанлу (Izanloo) – Фейкуриана (Fakoogian) – Джазди (Yazdi) – Саймона (Simon) [14]. Таким образом, возникает естественная идея использовать указанные фильтры при оценивании неизвестных параметров моделей стохастических линейных дискретных систем при наличии аномальных наблюдений, что и сделано в данной статье. Кроме того, на примере модели системы управления положения двигателя постоянного тока будет продемонстрирована целесообразность применения робастных фильтров Сярккя – Нумменмаа и Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона при решении соответствующих практических задач. Для расчетов использованы основные обозначения.

t_{k+1}, t_k – дискретные моменты времени;

$x(t_{k+1})$ – вектор состояния;

$\Phi(t_k)$ – матрица состояния;

$u(t_k)$ – вектор управления;

$\Psi(t_k)$ – матрица управления;

$w(t_k)$ – вектор шума системы;

$\Gamma(t_k)$ – матрица возмущения;

$y(t_{k+1})$ – вектор измерения;

$H(t_{k+1})$ – матрица наблюдения;

$v(t_{k+1})$ – вектор шума измерений;



$Q(t_k)$ – ковариационная матрица шума системы;

$R(t_{k+1})$ – ковариационная матрица шума измерений;

$E[\bullet]$ – оператор математического ожидания;

δ_{ki} – символ Кронекера;

$\bar{x}(t_0)$ – математическое ожидание начального состояния;

$P(t_0)$ – ковариационная матрица начального состояния;

Θ – вектор неизвестных параметров;

$\hat{x}(t_{k+1} | t_k)$ – оценка одношагового предсказания для состояния $x(t_{k+1})$, полученная по измерениям $y(t_1), \dots, y(t_k)$

$P(t_{k+1} | t_k)$ – ковариационная матрица ошибки одношагового предсказания;

$\hat{x}(t_{k+1} | t_{k+1})$ – оценка фильтрации для состояния $x(t_{k+1})$, полученная по измерениям $y(t_1), \dots, y(t_{k+1})$

$P(t_{k+1} | t_{k+1})$ – ковариационная матрица ошибки фильтрации;

$\hat{y}(t_{k+1} | t_{k+1})$ – оценка $y(t_{k+1})$, полученная по измерениям $y(t_1), \dots, y(t_{k+1})$

I – единичная матрица;

$\det A$ – определитель матрицы A ;

$(A)_{jj}$ – j -й диагональный элемент матрицы A ;

$(a)_j$ – j -й элемент вектора a ;

$\ln a$ – натуральный логарифм a .

Постановка задачи

Рассмотрим следующую управляемую, наблюдаемую и идентифицируемую модель стохастической линейной дискретной системы в пространстве состояний:

$$x(t_{k+1}) = \Phi(t_k)x(t_k) + \Psi(t_k)u(t_k) + \Gamma(t_k)w(t_k), \quad (1)$$

$$y(t_{k+1}) = H(t_{k+1})x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

где $x(t_k)$ – n -вектор состояния; $u(t_k)$ – r -вектор управления; $w(t_k)$ – p -вектор шума системы; $y(t_{k+1})$ – m -вектор измерения; $v(t_{k+1})$ – m -вектор шума измерений.

Предположим, что:

- случайные векторы $w(t_k)$, $v(t_{k+1})$ образуют белые гауссовские последовательности, причем

$$E[w(t_k)] = 0, \quad E[w(t_k)w^T(t_i)] = Q(t_k)\delta_{ki},$$

$$E[v(t_{k+1})] = 0, \quad E[v(t_{k+1})v^T(t_{i+1})] = R(t_{k+1})\delta_{ki},$$



$$E[w(t_k)v^T(t_i)] = 0,$$

для любых $k, i = 0, \dots, N-1$;

- начальное состояние $x(t_0)$ имеет нормальное распределение с параметрами

$$E[x(t_0)] = \bar{x}(t_0), \quad E[(x(t_0) - \bar{x}(t_0))(x(t_0) - \bar{x}(t_0))^T] = P(t_0),$$

и не коррелирует с $w(t_k)$, $v(t_{k+1})$ при любых значениях переменной k ;

- неизвестные параметры сведены в вектор $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s) \in \Omega_\Theta$ и могут входить в элементы матриц $\Phi(t_k)$, $\Psi(t_k)$, $\Gamma(t_k)$, $H(t_{k+1})$, $Q(t_k)$ в различных комбинациях.

Необходимо для моделей (1), (2) с учетом высказанных априорных предположений разработать на основе фильтров Сярккя – Нумменмаа и Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона программно-математическое обеспечение для решения задачи параметрического оценивания при наличии аномальных наблюдений в измерительных данных и провести численное исследование эффективности соответствующей вычислительной процедуры.

Робастные алгоритмы фильтрации

Фильтр Сярккя (Särkkä) – Нумменмаа (Nummenmaa). Фильтр Сярккя – Нумменмаа позволяет находить не только оценки вектора состояния и соответствующие им ковариационные матрицы, но и оценку ковариационной матрицы шума измерений порядка m , считая ее диагональной.

Инициализация:

$$\hat{x}(t_0 | t_0) = \bar{x}(t_0), \quad P(t_0 | t_0) = P(t_0);$$

$$\alpha(t_0 | t_0) = (\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{m0}), \quad \beta(t_0 | t_0) = (\beta_{10}, \beta_{20}, \dots, \beta_{m0});$$

$$L = L_0.$$

Выполнять в цикле по $k = \overline{0, N-1}$

$$\hat{x}(t_{k+1} | t_k) = \Phi(t_k)\hat{x}(t_k | t_k) + \Psi(t_k)u(t_k);$$

$$P(t_{k+1} | t_k) = \Phi(t_k)P(t_k | t_k)\Phi^T(t_k) + \Gamma(t_k)Q(t_k)\Gamma^T(t_k);$$

$$\varepsilon(t_{k+1}) = y(t_{k+1}) - H(t_{k+1})\hat{x}(t_{k+1} | t_k);$$

$$\alpha(t_{k+1} | t_{k+1}) = \left(\frac{1}{2} + \alpha_1(t_k | t_k), \dots, \frac{1}{2} + \alpha_m(t_k | t_k) \right);$$

$$\beta^1(t_{k+1} | t_{k+1}) = \beta(t_k | t_k).$$

Выполнять в цикле по $i = \overline{1, L}$

$$R^i(t_{k+1}) = \text{diag} \left(\frac{\beta_1^i(t_{k+1} | t_{k+1})}{\alpha_1(t_{k+1} | t_{k+1})}, \dots, \frac{\beta_m^i(t_{k+1} | t_{k+1})}{\alpha_m(t_{k+1} | t_{k+1})} \right);$$

$$B^i(t_{k+1}) = H(t_{k+1})P(t_{k+1} | t_k)H^T(t_{k+1}) + R^i(t_{k+1});$$

$$K^i(t_{k+1}) = P(t_{k+1} | t_k)H^T(t_{k+1})B^i(t_{k+1})^{-1};$$

$$\hat{x}^i(t_{k+1} | t_{k+1}) = \hat{x}(t_{k+1} | t_k) + K^i(t_{k+1})\varepsilon(t_{k+1});$$



$$P^i(t_{k+1} | t_{k+1}) = [I - K^i(t_{k+1})H(t_{k+1})]P(t_{k+1} | t_k).$$

Выполнять в цикле по $j = \overline{1, m}$

$$\beta_j^i(t_{k+1} | t_{k+1}) = \beta_j(t_k | t_k) + \frac{1}{2} \left((y(t_{k+1}) - H(t_{k+1})\hat{x}^i(t_{k+1} | t_{k+1}))_j \right)^2 + \\ + \frac{1}{2} (H(t_{k+1})P^i(t_{k+1} | t_{k+1})H^T(t_{k+1}))_{jj}.$$

Конец цикла по j

Конец цикла по i

$$\hat{x}(t_{k+1} | t_{k+1}) = \hat{x}^L(t_{k+1} | t_{k+1}); \quad P(t_{k+1} | t_{k+1}) = P^L(t_{k+1} | t_{k+1});$$

$$B(t_{k+1}) = B^L(t_{k+1}); \quad \beta(t_{k+1} | t_{k+1}) = \beta^L(t_{k+1} | t_{k+1}).$$

Конец цикла по k

Фильтр Изанлу (Izanloo) – Фейкуриана (Fakoorian) – Джазди (Yazdi) – Саймона (Simon). Фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона основывается на критерии максимальной коррентропии и методе взвешенных наименьших квадратов, позволяющий уменьшать влияние аномальных наблюдений. Приведем алгоритм данного фильтра с использованием эквивалентных форм представления матричного коэффициента усиления и ковариационной матрицы ошибок фильтрации из [15].

Инициализация:

$$\hat{x}(t_0 | t_0) = \bar{x}(t_0), \quad P(t_0 | t_0) = P(t_0);$$

$$\sigma = \sigma_0.$$

Выполнять в цикле по $k = \overline{0, N-1}$

$$\hat{x}(t_{k+1} | t_k) = \Phi(t_k)\hat{x}(t_k | t_k) + \Psi(t_k)u(t_k);$$

$$P(t_{k+1} | t_k) = \Phi(t_k)P(t_k | t_k)\Phi^T(t_k) + \Gamma(t_k)Q(t_k)\Gamma^T(t_k);$$

$$\varepsilon(t_{k+1}) = y(t_{k+1}) - H(t_{k+1})\hat{x}(t_{k+1} | t_k);$$

$$L(t_{k+1}) = \exp\left(-\frac{\varepsilon^T(t_{k+1})R^{-1}(t_{k+1})\varepsilon(t_{k+1})}{2\sigma^2}\right);$$

$$B(t_{k+1}) = H(t_{k+1})P(t_{k+1} | t_k)L(t_{k+1})H^T(t_{k+1}) + R(t_{k+1});$$

$$K(t_{k+1}) = P(t_{k+1} | t_k)L(t_{k+1})H^T(t_{k+1})B^{-1}(t_{k+1});$$

$$\hat{x}(t_{k+1} | t_{k+1}) = \hat{x}(t_{k+1} | t_k) + K(t_{k+1})\varepsilon(t_{k+1});$$

$$P(t_{k+1} | t_{k+1}) = [I - K(t_{k+1})H(t_{k+1})]P(t_{k+1} | t_k).$$

Конец цикла

Оценивание неизвестных параметров

Оценивание неизвестных параметров математической модели будем осуществлять по данным наблюдений Ξ в соответствии с критерием максимального правдоподобия χ .

Обозначим через $Y_1^N = [y^T(t_1), \dots, y^T(t_N)]^T$ выходной сигнал, соответствующий входному сигналу $U_0^{N-1} = [u^T(t_0), \dots, u^T(t_{N-1})]^T$. Тогда $\Xi = \{U_0^{N-1}, Y_1^N\}$.

В силу того, что измерительные данные содержат аномальные наблюдения, будем вычислять квазиправдоподобные оценки [16], решая оптимизационную задачу:



$$\hat{\Theta} = \arg \min_{\Theta \in \Omega_{\Theta}} [\chi(\Theta; \Xi)] = \arg \min_{\Theta \in \Omega_{\Theta}} [-Ln L(\Theta; \Xi)]. \quad (3)$$

Здесь

$$\chi(\Theta; \Xi) = \frac{Nm}{2} \ln 2\pi + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \varepsilon^T(t_{k+1}) B^{-1}(t_{k+1}) \varepsilon(t_{k+1}) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \ln \det B(t_{k+1}),$$

где $\varepsilon(t_{k+1})$ и $B(t_{k+1})$ определяются либо по уравнениям фильтра Сярккя – Нумменмаа, либо по уравнениям фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона.

Численные результаты эксперимента и их обсуждение

Используя робастные фильтры Джао – Чанга – Вэнга, Сярккя – Нумменмаа и Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона, исследуем эффективность процедуры параметрической идентификации на примере модели системы управления положением, состоящей из антенны и двигателя постоянного тока [17].

Пусть первая компонента вектора состояния отвечает за угловое положение антенны, вторая – за ее угловую скорость; входным сигналом является напряжение на входе усилителя постоянного тока, управляющего двигателем; с помощью потенциометра измеряется угловое положение, и выполняются все априорные предположения, высказанные при постановке задачи. Тогда модели состояния и наблюдения в дискретные моменты времени определяются соотношениями:

$$\begin{bmatrix} x_1(t_{k+1}) \\ x_2(t_{k+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\theta_1}(1 - e^{-\theta_1 T}) \\ 0 & e^{-\theta_1 T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t_k) \\ x_2(t_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\theta_2}{\theta_1}(T - \frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_1} e^{-\theta_1 T}) \\ \frac{\theta_2}{\theta_1}(1 - e^{-\theta_1 T}) \end{bmatrix} u(t_k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t_k);$$

$$y(t_{k+1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t_{k+1}) \\ x_2(t_{k+1}) \end{bmatrix} + v(t_{k+1}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1.$$

Здесь θ_1, θ_2 – неизвестные параметры и $\Omega_{\Theta} = \{1 < \theta_1 < 10, 0 < \theta_2 < 1\}$.

Положим $N = 100$, $u(t_k) = 12, k = 0, \dots, N-1$, $T = 0.1$, $Q(t_k) = Q = 0.01$,

$R(t_{k+1}) = R = 0.1$, $\bar{x}(t_0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $P(t_0) = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}$ и выберем значения параметров алгоритмов фильтрации в соответствии с табл. 1.

Для ослабления зависимости результатов оценивания от выборочных данных проведем $M = 100$ независимых запусков системы, а полученные оценки неизвестных параметров усредним. О качестве параметрической идентификации будем судить по значению относительной ошибки оценивания δ_{θ} , вычисляемой по следующей формуле:

$$\delta_{\theta} = \sqrt{\frac{(\theta_1^* - \hat{\theta}_1^{cp})^2 + (\theta_2^* - \hat{\theta}_2^{cp})^2}{(\theta_1^*)^2 + (\theta_2^*)^2}},$$



где $(\hat{\theta}_1^{cp}, \hat{\theta}_2^{cp})$ – усредненная оценка неизвестных параметров, полученная в соответствии с тем или иным методом оценивания по всем запускам (θ_1^*, θ_2^*) – истинные значения параметров.

Таблица 1

Значения параметров робастных фильтров

Table 1

Values of robust filter parameters

Фильтр / Filter	Значения параметров фильтра / Values of filter parameters
Фильтр Джао – Чанга – Вэнга / Jwo – Chung – Weng filter	$R(t_0) = 0.2$
Фильтр Сярккя – Нумменмаа / Särkkä – Nummenmaa filter	$\alpha_{10} = \beta_{10} = 1, L_0 = 4$
Фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона / Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter	$\sigma_0 = 1$

С помощью программной среды Matlab смоделируем выборки с аномальными измерениями, расположенными случайным образом, задав коэффициент загрязнения выборки $\gamma = 0.1$ и дисперсию шума аномальных наблюдений $R_A = 1000R$, считая, что истинные значения параметров $\theta_1^* = 4.6$, $\theta_2^* = 0.787$. Для решения оптимизационной задачи (3) воспользуемся алгоритмом обобщенного поиска по образцу, реализованного в функции patternsearch пакета расширения Toolbox Global Optimization системы Matlab [18]. Численные результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Численные результаты параметрической идентификации
(случайный характер аномальных измерений)**

Table 2

**Numerical results of the parametric identification
(random outliers)**

Фильтр / Filter	$\hat{\theta}_1^{cp}$	$\hat{\theta}_2^{cp}$	δ_θ
Фильтр Калмана / Kalman filter	1.7217	0.3068	0.625
Фильтр Джао – Чанга – Вэнга / Jwo – Chung – Weng filter	4.8849	0.8376	0.062
Фильтр Сярккя – Нумменмаа / Särkkä – Nummenmaa filter	4.8010	0.8258	0.044
Фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона / Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter	4.7798	0.8203	0.039

Приведем графическое представление результатов параметрической идентификации на основе фильтра Калмана и фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона в пространстве откликов (на примере одной реализации входного сигнала) на рис. 1, где $\hat{y}(t_{k+1}) = H(t_{k+1})\hat{x}(t_{k+1} | t_{k+1})$ и $\hat{x}(t_{k+1} | t_{k+1})$ вычисляется в соответствии с определенным алгоритмом фильтрации.

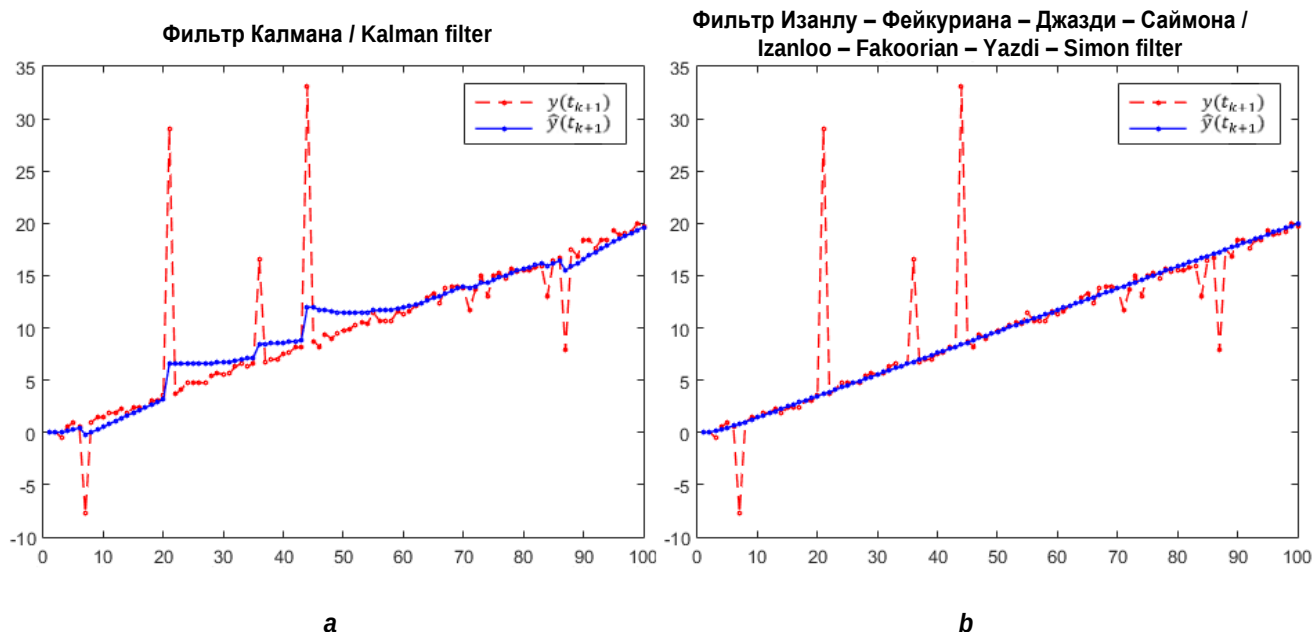


Рис. 1. Графическое представление $y(t_{k+1})$ и $\hat{y}(t_{k+1})$ при случайном характере аномальных измерений:
а – фильтр Калмана; б – фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона
Fig. 1. Graphical representation of $y(t_{k+1})$ and $\hat{y}(t_{k+1})$ under random outliers:
a – Kalman filter; b – Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter

Изменим характер расположения аномальных измерений, разместив их двумя группами – по пять наблюдений в каждой, и смоделируем новые выборки измерений. Обработаем измерительные данные предложенными робастными процедурами и приведем численные результаты параметрической идентификации в табл. 3. Графическое представление результатов параметрической идентификации в пространстве откликов (на примере одной реализации входного сигнала) приведем на рис. 2.

Таблица 3

Численные результаты параметрической идентификации
(группированный характер аномальных измерений)

Table 3

Numerical results of parametric identification
(grouped outliers)

Фильтр / Filter	$\hat{\theta}_1^{cp}$	$\hat{\theta}_2^{cp}$	δ_θ
Фильтр Калмана / Kalman filter	1.9345	0.3410	0.579
Фильтр Джао – Чанга – Вэнга / Jwo – Chung – Weng filter	5.2076	0.8872	0.132
Фильтр Сярка – Нумменмаа / Särkkä – Nummenmaa filter	4.8901	0.8358	0.063
Фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона / Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter	4.7829	0.8180	0.040

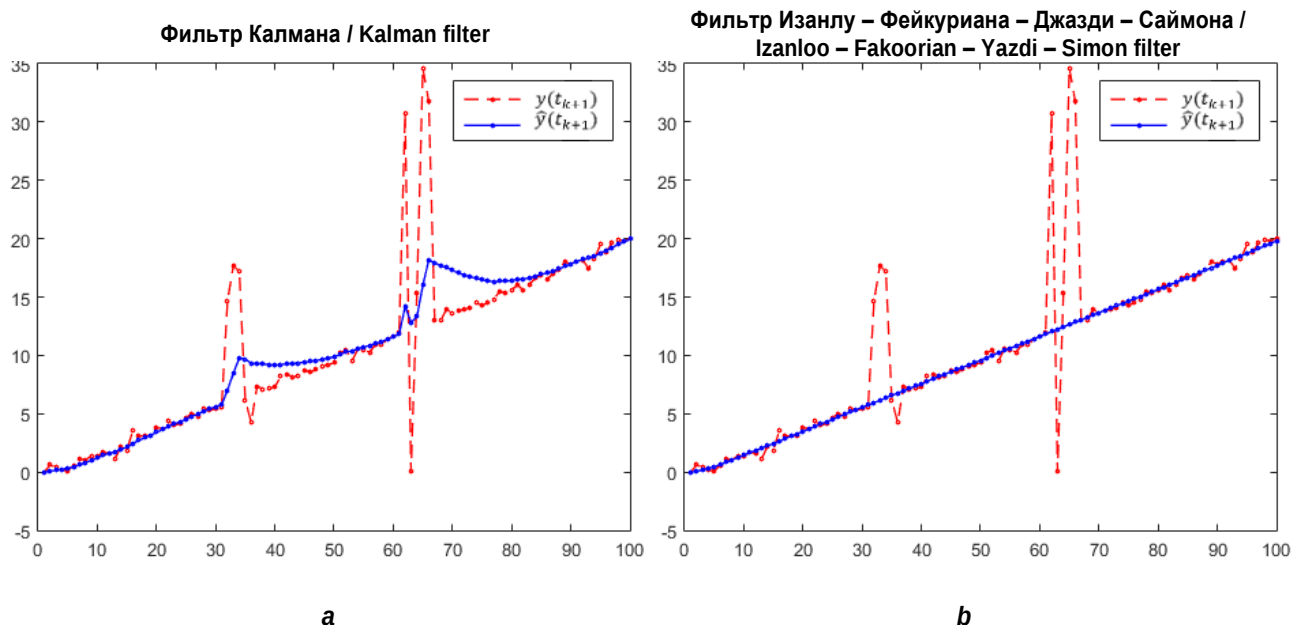


Рис. 2. Графическое представление $y(t_{k+1})$ и $\hat{y}(t_{k+1})$ при случайном характере аномальных измерений:
a – фильтр Калмана; b – фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона
Fig. 2. Graphical representation of $y(t_{k+1})$ and $\hat{y}(t_{k+1})$ under random outliers:
a – Kalman filter; b – IZanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter

Анализ содержимого табл. 2 и 3 показывает, что задача оценивания параметров при помощи традиционного фильтра Калмана решается плохо (относительные ошибки оценивания составляют 62,5% и 57,9%, соответственно, при случайном характере аномальных измерений и группированном характере). Применение фильтра Сярккя – Нумменмаа позволяет повысить качество оценивания на 1,8% при случайном характере аномальных измерений и на 6,81% при группированном характере по сравнению с фильтром Джао – Чанга – Вэнга. Применение фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона повышает качество оценивания на 2,3% и 9,2% соответственно.

Заключение

В работе исследована эффективность процедуры параметрической идентификации стохастических дискретных систем на основе устойчивых к аномальным наблюдениям фильтров Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона, Сярккя – Нумменмаа и Джао – Чанга – Вэнга.

На примере модели системы управления положением двигателя постоянного тока при различном характере расположения аномальных наблюдений было показано, что робастная процедура оценивания на основе фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона дает наиболее точные оценки параметров.

В дальнейших исследованиях будет разработан алгоритм активной параметрической идентификации линейных дискретных систем на основе фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию (проект № 2.7996.2017/8.9).



Библиографический список

1. Боровков А.А. Математическая статистика. Новосибирск: Наука, 1984. 472 с.
2. Ивченко Г.И., Медведев Ю. И. Математическая статистика. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. 352 с.
3. Gupta N.K., Mehra R.K. Computational aspects of maximum likelihood estimation and reduction in sensitivity function calculations // IEEE transactions on automatic control. 1974. Vol. 19. № 6. P. 774–783.
4. Åström K. J. Maximum likelihood and prediction errors methods // Automatica. 1980. Vol. 16. P. 551–574.
5. Лjung Л. Идентификация систем. Теория для пользователей / пер. с англ. М.: Наука, 1991. 432 с.
6. Денисов В.И., Чубич В.М., Черникова О.С., Активная параметрическая идентификация стохастических линейных дискретных систем во временной области // Сибирский журнал индустриальной математики. 2003. Т. 6. № 3. С. 70–87.
7. Цыганова Ю.В., Куликова М.В. Об эффективности методов параметрической идентификации линейных дискретных стохастических систем // Автоматика и телемеханика. 2012. № 6. С. 34–51.
8. Maronna R.A., Martin D.R., Yohai V.J. Robust statistics. Theory and methods. England: John Wiley Sons, 2006. 400 p.
9. Huber P. J., Ronchetti E.M. Robust statistics. New Jersey: John Wiley Sons, 2009. 371 с.
10. Чубич В.М., Черникова О.С., Долгов А.А. Робастное оценивание параметров моделей гауссовских линейных дискретных систем на основе гибридного фильтра // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4. С. 100–107. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-100-107>
11. Jwo D.-J. Chung F.-C., Weng T.-P., Thomas C. Adaptive Kalman filter for navigation sensor fusion // Sensor Fusion and its Applications. In TechOpen, 2010. P. 66–90.
12. Чубич В.М., Прокофьева А.Э. Сравнительный анализ некоторых робастных фильтров для нестационарных линейных дискретных систем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 12. С. 123–137. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-12-123-137>
13. Izanloo R., Fakoorian S.A., Yazdi H.S., Simon D. Kalman filtering based on the maximum correntropy criterion in the presence of non- Gaussian noise // Annual Conference on Information Science and Systems (CISS), Princeton, USA: proceedings. 2016. P. 500–505.
14. Särkkä S., Nummenmaa A. Recursive noise adaptive Kalman filtering by variational Bayesian approximations // IEEE Transactions on Automatic control. 2009. Vol. 54. P. 596–600.
15. Kulikova M.V. Square-root algorithms for maximum correntropy estimation of linear discrete-time systems in presence of non-Gaussian noise // Systems & Control Letters. 2017. Vol. 108. P. 8–15.
16. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. Квазиправдоподобные оценки. М.: Радио и связь, 1983. 304 с.
17. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления / Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 650 с.
18. Гольдштейн А.Л. Оптимизация в среде MATLAB. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. 192 с.

References

1. Borovkov, A.A. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Novosibirsk: Science Publ., 1984, 472 p. (In Russian).
2. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow: LIBROKOM Publ., 2014, 352 p. (In Russian).
3. Gupta N.K., Mehra R.K. Computational aspects of maximum likelihood estimation and reduction in sensitivity function calculations // IEEE transactions on automatic control. 1974, vol. 19, no 6, pp. 774–783.
4. Åström K.J. Maximum likelihood and prediction errors methods // Automatica. 1980, vol. 16, pp. 551–574.
5. Ljung L. System Identification: Theory for the User, 1987, 225 p. (Russ. ed.: Identifikacija sistem. Teorija dlja pol'zovatelej. Moscow, Nauka Publ., 1987, 225 p.)
6. Denisov V.I., Chubich M.V., Chernikova S.O. Active parametric identification of stochastic linear discrete systems in a time domain. *Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki* [Siberian Journal of Industrial Mathematics], 2003, vol. 6, no 3, pp. 70–87. (In Russian).
7. Tsyganova Yu.V., Kulikova M.V. On efficient parametric identification methods for linear discrete stochastic systems. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2016, no 6, pp. 34–51. (In Russian).
8. Maronna R.A., Martin D.R., Yohai V.J. Robust statistics. Theory and methods. England: John Wiley Sons, 2006, 400 p.
9. Huber P. J., Ronchetti E.M. Robust statistics. New Jersey: John Wiley Sons, 2009, 3071 p.
10. Chubich M.V., Chernikova S.O., Dolgov A.A. Robust estimation of parameters of Gaussian models linear discrete systems based on hybrid filter. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 4, pp. 100–107. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-100-107>
11. Jwo D.-J. Chung F.-C., Weng T.-P., Thomas C. Adaptive Kalman filter for navigation sensor fusion // Sensor Fusion and its Applications. In TechOpen, 2010, pp. 66–90.
12. Chubich V. M., Prokofeva A.E. Comparative analysis of some robust filters for non-stationary linear discrete systems.



- Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 12, pp. 123–137. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-12-123-137>
13. Izanloo R., Fakoorian S.A., Yazdi H.S., Simon D. Kalman filtering based on the maximum correntropy criterion in the presence of non- Gaussian noise. Annual Conference on Information Science and Systems (CISS), Princeton, USA: proceedings, 2016, pp. 500–505.
14. Särkkä S., Nummenmaa A. Recursive noise adaptive Kalman filtering by variational Bayesian approximations. IEEE Transactions on Automatic control, 2009. Vol. 54, pp. 596–600.
15. Kulikova M.V. Square-root algorithms for maximum correntropy estimation of linear discrete-time systems in presence of non-Gaussian noise. Systems & Control Letters, 2017, vol. 108, pp. 8–15.
16. Mudrov VI, Kushko V.L. *Metody obrabotki izmereniy. Kvazipravdopodobnyye otsenki* [Methods for measurement processing. Quasi-like estimates]. Moscow: Radio and communication Publ., 1983, 304 p. (In Russian).
17. Kwakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems, 1972, 595 p. (Russ. ed.: Linejnye optimal'nye sistemy upravlenija. New York, John Wiley Sons Publ., 1972, 595 p.)
18. Goldstein A.L. *Optimizacija v srede MATLAB* [Optimization in MATLAB environment]. Perm: Publishing house of Perm national research polytechnic university, 2015, 192 p. (In Russian).

Критерии авторства

Чубич В.М., Прокофьева А.Э. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Chubich V.M., Prokofieva A.E. have equal copyrights for the article 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.



ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ

© Е.В. Болоев¹, И.И. Голуб², В.В. Федчишин³

^{1, 2}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

³Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Использование источников возобновляемой генерации приводит к появлению в распределительных сетях низкого напряжения двунаправленных перетоков и перенапряжений. Необходимая для эффективного мониторинга и управления распределительной сетью информация о текущих значениях всех переменных режима может быть получена в результате обработки измерений, поступающих от интеллектуальных счетчиков. В работе предлагается новый подход к решению проблемы оценивания состояния трехфазной распределительной сети по измерениям модулей напряжений и узловых мощностей или токов. **МЕТОДЫ.** Задачу нелинейного оценивания состояния по измерениям мощностей и напряжений, вместо традиционно используемого для этой цели метода Ньютона, предлагается решать методом простой итерации. Минимизация квадратичной функции остатков на каждой простой итерации и при линейном оценивании состояния по измерениям узловых токов напряжений производится методом взвешенных наименьших квадратов, с учетом или без учета ограничений на нулевые токи в транзитных узлах, либо методом матрицы Хечтла. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Эффективность предложенных методов проиллюстрирована на примере линейного оценивания состояния, а также нелинейного оценивания состояния для каждого часа суточного графика изменения узловых мощностей для 32-узловой трехфазной тестовой сети низкого напряжения. **ВЫВОДЫ.** Использование метода простой итерации для нелинейного оценивания состояния делает эту процедуру столь же тривиальной, как и линейное оценивание состояния. Метод матрицы Хечтла позволяет получить минимальное значение целевой функции по сравнению со значением целевой функции для взвешенного метода наименьших квадратов без учета и с учетом ограничений.

Ключевые слова: распределительная сеть, возобновляемая генерация, наблюдаемость, оценивание состояния, интеллектуальные счетчики, метод простой итерации.

Информация о статье. Дата поступления 24 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 23 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Болоев Е.В., Голуб И.И., Федчишин В.В. Оценивание состояния распределительной сети низкого напряжения по измерениям интеллектуальных счетчиков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 95–106. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-95-106

LOW VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK STATE ESTIMATION BASED ON SMART METER READINGS

E.V. Boloev, I.I. Golub, V.V. Fedchishin

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

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

ABSTRACT. PURPOSE. The use of renewable generation sources causes bidirectional power flows and overvoltages in low voltage distribution networks. The information on the current values of all mode variables, which is necessary for the efficient monitoring and control of the distribution network can be obtained through the processing of measurements from

¹Болоев Евгений Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: boloev@isem.irk.ru

Evgeniy V. Boloev, Candidate of technical sciences, Senior Researcher, e-mail: boloev@isem.irk.ru

²Голуб Ирина Ивановна, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник,
e-mail: golub@isem.irk.ru

Irina I. Golub, Doctor of technical sciences, Professor, Leading Researcher, golub@isem.irk.ru

³Федчишин Вадим Валентинович, кандидат технических наук, доцент, директор Института энергетики, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем, e-mail: fedchishin@istu.edu

Vadim V. Fedchishin, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Power Engineering, Head of the Department of Electric Power Stations, Networks and Systems, e-mail: fedchishin@istu.edu



the smart meters. The paper proposes a new approach to the solution of the state estimation problem of a three phase distribution network based on the measurements of voltage modules and nodal powers or currents. **METHODS.** It is proposed to solve the nonlinear state estimation problem on the basis of nodal power and voltage measurements instead of Newton's method traditionally used for this purpose. The quadratic function of residuals at each simple iteration and at linear state estimation based on the measurements of nodal currents and voltages is minimized by the weighted least squares method with or without constraints on zero currents at the transit nodes or by the Hachtel matrix method. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The effectiveness of the proposed methods is illustrated using linear and nonlinear state estimation for each hour of the daily curve of nodal power variations for the three phase 32 node low voltage test network. **CONCLUSIONS.** Application of the simple iteration method for nonlinear state estimation makes this procedure as trivial as the procedure of linear state estimation. The Hachtel matrix method allows to obtain the minimum value of the objective function compared to the value of the objective function for the weighted least squares method with and without constraints.

Keywords: *distribution network, renewable generation, observability, state estimation, smart meters, simple iteration method*

Article info. Received November 24, 2017; accepted January 23, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Boloev E.V., Golub I.I., Fedchishin V.V. Low voltage distribution network state estimation based on smart meter readings. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 95–106. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-95-106

Введение

Около пятидесяти лет, начиная с первых публикаций Швеппе [1, 2], развиваются методы оценивания состояния (ОС) электрической сети по данным измерений, позволяющие сформировать расчетную модель сети для ее текущего мониторинга и анализа. Широкое распространение эти подходы получили в высоковольтных сетях, где наличие большого числа измерений позволяет выявить и удалить из них ошибочные и тем самым повысить точность оценок переменных текущего режима. Важнейшим событием, позволившим существенно повысить надежность процедуры ОС, явилось внедрение синхронизированных векторных измерений PMU, используемых главным образом в высоковольтных сетях. Синхронизация PMU-измерений осуществляется с помощью GPS приемников, позволяющих передавать в систему сбора и обработки данных измерения, снабженные временными метками.

Первичная и вторичная распределительные сети, соответственно среднего и низкого напряжения, работают как разомкнутые, перетоки мощности в фидерах таких сетей ориентированы от первичной распределительной подстанции в нагрузочные узлы. Вторичная распределительная сеть моделируется как трехфазная сеть с нулевым проводом, ее нагрузки мо-

гут быть однофазными, двухфазными и трехфазными, в результате чего возникает нагрузочная несимметрия. Поперечные составляющие падений напряжения в секциях фидеров практически равны нулю, что связано с большим отношением активных сопротивлений к индуктивным и малыми длинами отдельных секций.

В традиционных распределительных сетях измерения, как правило, установлены только на первичных подстанциях ВН/СН со стороны среднего напряжения, а о состоянии вторичных распределительных подстанций СН/НН ничего не известно. Существуют методы, в которых такие измерения применяются для приближенной оценки потерь энергии в распределительной сети [3], но для ОС их слишком мало.

Переход пассивной распределительной сети к активной связан: с введением в нее неуправляемых источников возобновляемой генерации, имеющей стохастическую природу; накопителей энергии, зарядка и разрядка которых может рассматриваться как дополнительная нагрузка или генерация; активных или гибких нагрузок, позволяющих переводить нагрузки пикового периода в непииковый. Направления перетоков мощности в активных сетях изменяются в течение суток, нагрузочные узлы могут стать генераторными, а отклонения



напряжений превысить допустимые значения.

Информация о состоянии активной низковольтной распределительной сети может быть получена методами ОС по измерениям интеллектуальных счетчиков, называемых Smart meter (SM), которые устанавливаются на вторичной распределительной подстанции, а также в нагрузочных и/или генераторных узлах. Синхронизированные PMU-измерения из-за их большой стоимости в низковольтных распределительных сетях не устанавливаются. За передачу информации от SM в систему сбора и обработки данных и в обратном направлении отвечает современная измерительная инфраструктура Advanced Metering Infrastructure (AMI) [4], объединяющая активную распределительную сеть с коммуникационной сетью и современной структурой измерений. Некоторые SM кроме потребляемой энергии могут измерять активные и реактивные мощности, активные и реактивные токи и модули напряжений. Эта информация обрабатывается алгоритмами ОС, результаты передаются в систему управления распределительной сетью для: контроля реактивной мощности; обнаружения несимметрии и недопустимых отклонений напряжений; снижения потерь энергии; коммутации конденсаторов;

управления перегрузками; реконфигурации сети; управления выключателями и реклоузерами; управления спросом определения ценовых сигналов.

На вопрос о возможности синхронизации измерений SM единого ответа нет. В первых публикациях о SM [5] утверждалось, что существует возможность синхронизации SM-измерений токов и напряжений в одной и той же распределительной сети с помощью коммуникационной PLC-технологии, позволяющей передавать измерения непосредственно по линии электропередачи. Однако в последующих работах [6] были проанализированы факторы, препятствующие синхронизации, например, задержка передачи измерений по коммуникационным каналам, составляющая от нескольких секунд до нескольких минут и даже до одного дня; в то время обновление измерений производилось не чаще, чем через 15 мин.

Несмотря на существование методов синхронизации SM-измерений, такие измерения, как правило, не синхронизированы и не могут использоваться для ОС, поскольку это приведет к недопустимому снижению точности оценок. В [7] предлагается компенсировать несинхронизированность увеличением погрешности измерений при ОС до 10%.

Оценивание состояния в распределительной сети

Проанализируем возможность использования для ОС вторичной распределительной сети двух вариантов SM-измерений в нагрузочных и/или генераторных узлах:

– активных $z_p^{a,b,c}$ и реактивных $z_q^{a,b,c}$ узловых мощностей и модулей напряжений $z_U^{a,b,c}$ в фазах a, b, c ;

– активной $z_{Ja}^{a,b,c}$ и реактивной $z_{Jp}^{a,b,c}$ составляющей узловых токов и модулей напряжений $z_U^{a,b,c}$ в фазах a, b, c .

Дополнительными измерениями, называемыми псевдоизмерениями, являются нулевые значения активных и реак-

тивных мощностей и активных и реактивных составляющих узловых токов в транзитных узлах.

Вторичная распределительная сеть моделируется как трехфазная четырехпроводная [8], включающая три фазы и нулевой провод, без учета взаимных сопротивлений между фазными проводами и поперечных проводимостей линий на землю.

В качестве элементов вектора состояния выступают продольные $u_i'^{a,b,c}$ и поперечные составляющие $u_i''^{a,b,c}$ векторов фазных напряжений $u^{a,b,c} = u_i'^{a,b,c} + j u_i''^{a,b,c}$ в узлах $i = 1, \dots, n$ расчетной схемы. В качестве измеренных напряжений могут быть



заданы их продольные составляющие, равные измеренным модулям напряжений. Допустимость такой замены основана на том, что поперечные составляющие напряжений в низковольтной сети близки к нулю. Поперечная составляющая напряжения в корневом узле, из которого вторичная распределительная сеть получает питание, фиксируется на нулевом значении.

Для первого варианта измерений предлагается использовать процедуру ОС, состоящую из двух итерационно повторяющихся шагов. На первом шаге по измеренным значениям активной и реактивной узловых мощностей и модулей напряжений в узле i определяются значения псевдоизмерений узловых токов

$$z_{Jai}^{a,b,c} - jz_{Jpi}^{a,b,c} = (z_{iP}^{a,b,c} - jz_{iQ}^{a,b,c}) / z_{U'i}^{a,b,c},$$

а на втором шаге по псевдозамерам токов и продольным составляющим напряжений из решения линейной системы уравнений измерений определяются переменные состояния. Итерационный процесс заканчивается, когда максимальная разность между переменными состояния, полученными на смежных итерациях, не превышает наперед заданной точности расчета. Такую процедуру решения нелинейной системы уравнений измерений, называемую методом простой итерации, в данной работе предлагается применять для ОС вторичной распределительной сети вместо традиционно используемого итерационного метода Ньютона, основанного на линеаризации уравнений измерений путем их разложения в ряд Тейлора. Известно, что метод простой итерации хорошо работает при удачно заданных исходных значениях узловых напряжений, используемых для определения узловых токов. В рассматриваемом случае, предполагающем, что SM измеряют и узловые мощности, и напряжения, это условие выполняется.

Для второго варианта измерений процедура ОС включает решение только линейной системы уравнений измерений

узловых токов и продольных составляющих напряжений.

Линейные уравнения измерений, соответствующие измеренным фазным значениям активной и реактивной составляющих токов и продольной составляющей напряжения в узле i , можно представить как

$$\begin{pmatrix} g_i^{a,b,c} & b_i^{a,b,c} \\ -b_i^{a,b,c} & g_i^{a,b,c} \\ I^{a,b,c} & 0^{a,b,c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i'^{a,b,c} \\ u_i''^{a,b,c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{Jai}^{a,b,c} \\ z_{Jpi}^{a,b,c} \\ z_{U'i}^{a,b,c} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $g_i^{a,b,c}$ и $b_i^{a,b,c}$ – матрицы активных и реактивных узловых проводимостей; $I^{a,b,c}$ и $0^{a,b,c}$ – единичная и нулевая матрицы.

В общем виде система (1) может быть записана как

$$H_z^{a,b,c} \cdot u^{a,b,c} = z_z^{a,b,c}. \quad (2)$$

Аналогично для нулевых узловых токов в транзитном узле i уравнения измерений будут иметь вид

$$\begin{pmatrix} g_i^{a,b,c} & b_i^{a,b,c} \\ -b_i^{a,b,c} & g_i^{a,b,c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i'^{a,b,c} \\ u_i''^{a,b,c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{Jai}^{a,b,c} \\ z_{Jpi}^{a,b,c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

или

$$H_0^{a,b,c} \cdot u^{a,b,c} = 0. \quad (4)$$

Представим объединение систем уравнений (2) и (4) как

$$H \cdot u = \begin{pmatrix} H_z^{a,b,c} \\ H_0^{a,b,c} \end{pmatrix} \cdot u^{a,b,c} = \begin{pmatrix} z_z^{a,b,c} \\ 0 \end{pmatrix} = \bar{z}. \quad (5)$$

Система (5) имеет единственное решение, если число уравнений в ней равно числу переменных – базисная система измерений, а ранг матрицы H , называемой матрицей наблюдаемости [9, 10], равен числу переменных состояния. Для сглаживания влияния ошибок в отдельных измерениях на оценки переменных состоя-



ния уравнения измерений умножаются на весовые коэффициенты $R^{-1/2}$

$$R^{-1/2}H \cdot u = R^{-1/2}\bar{z}, \quad (6)$$

где R – дисперсии ошибок измерений.

На решение базисной системы измерений такое взвешивание влияния не оказывает. Необходимым условием эффективности взвешивания является обеспечение избыточности, обеспечивающей отсутствие критических измерений, выпадение которых приводит к потере наблюдаемости. Матрица $R^{-1/2}H$ при наличии избыточных измерений становится переопределенной, поскольку имеет большее число строк, чем число столбцов. Классического решения для переопределенной системы (6) не существует, однако для нее можно получить вектор решения u , позволяющий минимизировать расстояние между векторами правой и левой части (6), для чего используется критерий минимизации суммы квадратов разностей

$$J(u) = (\bar{z} - Hu)^T R^{-1}(\bar{z} - Hu). \quad (7)$$

Такой метод называется методом взвешенных наименьших квадратов, а решение задачи минимизации может быть получено из нормальной системы уравнений с квадратной матрицей

$$(H^T R^{-1}H)u = H^T R^{-1}\bar{z}. \quad (8)$$

Оценки переменных состояния, полученные в результате решения (8),

$$u = (H^T R^{-1}H)^{-1} H^T R^{-1}\bar{z}, \quad (9)$$

используются для расчета оценок z измеренных переменных, в нашем случае – узловых токов и модулей напряжений

$$z = H(H^T R^{-1}H)^{-1} H^T R^{-1}\bar{z} = Hu, \quad (10)$$

$$r = \bar{z} - z = \bar{z} - Hu \quad (11)$$

и взвешенных остатков

$$R^{-1/2}r = R^{-1/2}(\bar{z} - z) = R^{-1/2}(\bar{z} - Hu). \quad (12)$$

Критерий (7) через взвешенные остатки может быть записан как

$$J(u) = r^T R^{-1}r. \quad (13)$$

Уменьшение весовых коэффициентов для измерений, имеющих большие остатки, или исключение их из состава измерений может способствовать увеличению точности оценок всех переменных режима. Еще одним фактором, оказывающим влияние на оценки, является обусловленность матрицы $(H^T R^{-1}H)$, характеризующая влияние погрешностей измерений на погрешности оценок переменных состояния. Кроме того, что при составе измерений, включающем большое число узловых мощностей, обусловленность хуже, чем при измерении перетоков, существует дополнительный фактор, приводящий к ухудшению обусловленности, каким является необходимость задания очень больших весовых коэффициентов для уравнений (4), связанных с нулевыми токами.

Для получения решения, обеспечивающего равенство нулю токов в транзитных узлах, минимизация (7) заменяется [11] минимизацией функции Лагранжа, включающей функцию $J_z(u)$, записанную только для измеренных переменных, и ограничения равенства (4)

$$L = 0.5 \cdot (\bar{z} - H_z u)^T R_z^{-1}(\bar{z} - H_z u) - \lambda^T H_0 u. \quad (14)$$

Решение линейной системы уравнений с квадратной матрицей позволяет определить оценки переменных состояния u

$$\begin{pmatrix} H_z^T R_z^{-1} H_z & H_0^T \\ H_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_z^T R_z^{-1} \bar{z}_z \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

остатков

Такой метод решения в [11] назван методом взвешенных наименьших квадратов с ограничениями.

Для увеличения численной устойчивости в [12] предлагается в функции Лагранжа выразить $J_z(u)$ через остатки (13) и дополнительно к ограничению (4) добавить приравненное нулю ограничение (11)

$$L = 0.5 \cdot r^T R_z^{-1} r - \lambda^T H_0 u - \mu^T (r - \bar{z} + H_z u). \quad (16)$$

Решение относительно u , λ и μ в этом случае может быть получено из линейной системы уравнений с матрицей Хетчела:

$$\begin{bmatrix} R_z & H_z & 0 \\ H_z^T & 0 & H_0^T \\ 0 & H_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ u \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{z} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Для оценивания состояния используется только вектор u .

Очевидно, что матрицы в уравнениях (8), (15), (17), записанные для трех фаз, являются очень большими, создающими дополнительные вычислительные проблемы, по сравнению со случаем расчета для одной фазы при симметричных нагрузках. Опыт расчета потокораспределения в низковольтной четырехпроводной распределительной сети с несимметричными нагрузками фаз [3] показывает, что при равных нулю взаимных сопротивлений между фазными проводами, нулевым проводом и проводом, моделирующим землю, расчет потокораспределения для каждой фазы может проводиться независимо. Токи и напряжения в нулевом проводе и в земле могут быть определены на втором этапе расчета. Такой же подход возможно использовать и для ОС независимо для каждой фазы.

Результаты и их обсуждение

Проиллюстрируем эффективность использования указанных подходов для оценивания состояния трехфазной тестовой сети, данные о топологии, рис. 1, часовых узловых мощностях, складывающихся из подключенных к узлам нагрузок и генераций возобновляемых источников – фотогальваников (взяты из работы [13]).

Сеть включает 32 узла, узел с номером 1 – корневой. На рис. 2 показаны актив-

ные узловые мощности в фазах a , b и c для 14-го часа суточного графика. В фазе a 15 транзитных узлов; 12 узлов – с нагрузкой; 4 – с генерацией. Число транзитных, нагрузочных и генераторных узлов для 14-го часа суточного графика узловых мощностей для фазы b равно 13, 13 и 5, а для фазы c – 17, 10 и 4.

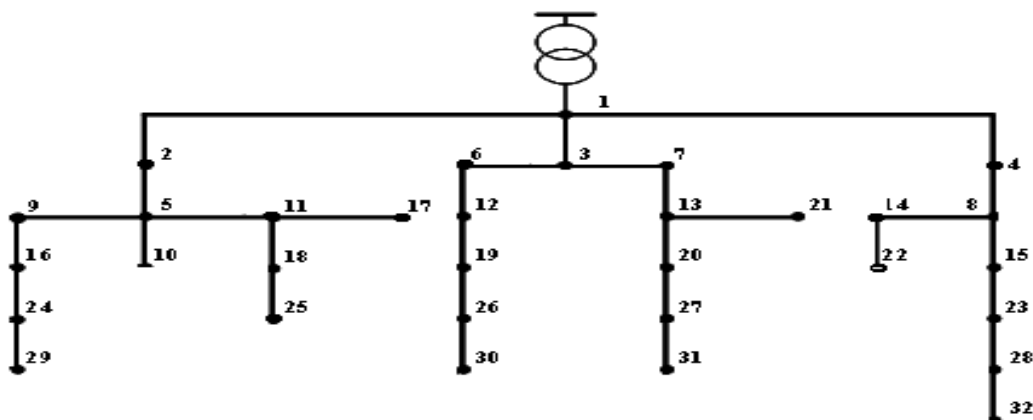


Рис. 1. Топология вторичной распределительной сети
Fig. 1. Topology of the secondary distribution network

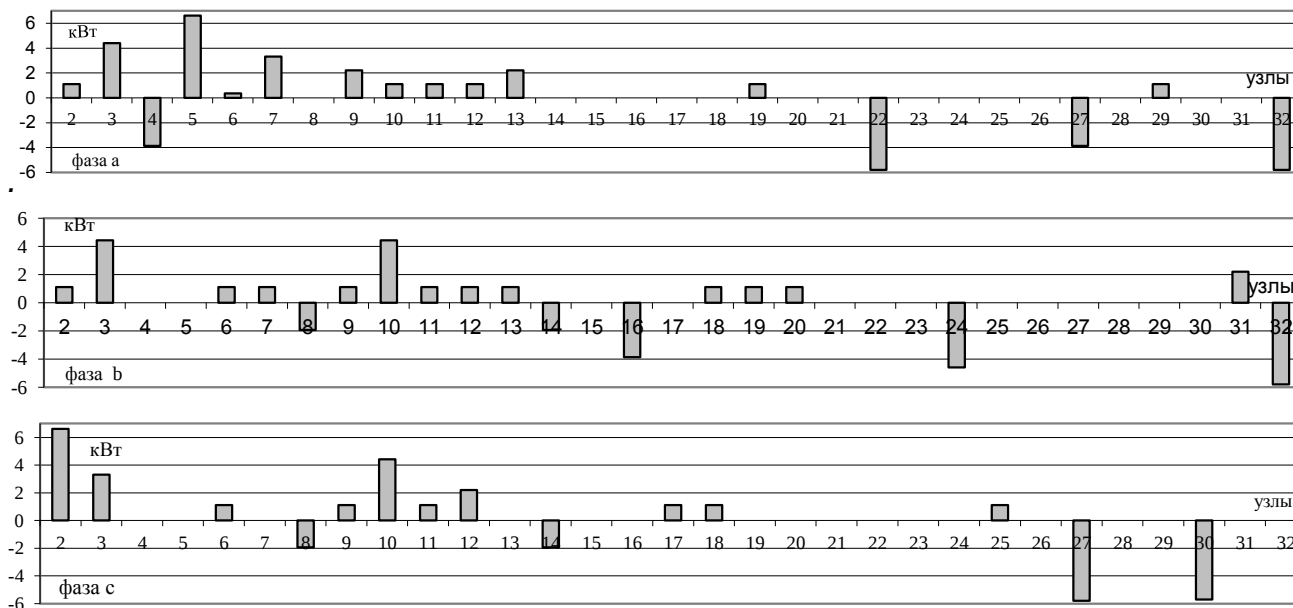


Рис. 2. Активные мощности в фазах a , b , c тестовой сети для 14-го часа суточного графика
Fig. 2. Active powers in phases a , b , c of the test network for the 14th hour of the daily curve

Информация о нагрузках и генерациях явилась основой для расчета потокораспределения каждой фазы тестовой сети, при этом для активных и индуктивных сопротивлений фазных проводов взяты значения, типичные для низковольтных распределительных сетей. Результаты расчета потокораспределения, названные тестовыми, использовались для подготовки измерений активной и реактивной составляющих узловых токов и модулей напряжений, включающих погрешности измерений. Для моделирования погрешностей в измерениях в тестовые значения токов и напряжений вводились погрешности, среднеквадратические отклонения которых для активных и реактивных токов принимались 0.3 A, а для напряжений – 0.4 V.

Минимальное число измерений, обеспечивающих топологическую наблюдаемость тестовой сети, равно 64: 32 – для активной модели и 31, с учетом фиксированного в корневом узле каждой фазы нулевого значения поперечной составляющей напряжения, – для реактивной. Для обеспечения наблюдаемости SM должны быть установлены в узлах, не являющихся транзитными. В этом случае измерения и псевдоизмерения 31 активных составляющих

узловых токов и равной измерению модуля напряжения его продольной составляющей в одном из узлов каждой фазы можно считать базисными.

В число избыточных измерений в активной модели войдут продольные составляющие напряжений, равные измерениям модулей напряжений в узлах, не являющихся транзитными, за вычетом измерения напряжения, включенного в базисный состав. В фазе a будет 15 избыточных измерений, в фазе b – 17, а в фазе c – 13. Такая же избыточность измерений может быть обеспечена и в реактивной модели, если в число избыточных измерений в узлах с измеренными модулями напряжений включить равные нулю измерения поперечных составляющих напряжений, но такой подход требует дополнительного исследования.

На рис. 3 приведены диаграммы относительных значений продольных составляющих напряжений в узлах с измеренными напряжениями в фазах a , b , c тестовой сети на рис. 1, включающие напряжения тестового потокораспределения, измерения напряжений, полученные на основе тестовых напряжений с использованием настроенного на нормальный закон рас-



пределения датчика случайных чисел и оценки напряжений, полученные методами взвешенных наименьших квадратов с и без ограничений на токи в транзитных узлах и методом матрицы Хечтела.

Сравнение оценок напряжений, полученных тремя анализируемыми методами линейного оценивания состояния, пока-

зывает, что остатки для напряжений во всех методах очень близки и не позволяют идентифицировать лучший метод. Этот вывод следует и из показанных на рис. 4 диаграмм (1) суммарных относительных значений остатков для продольных составляющих напряжений.

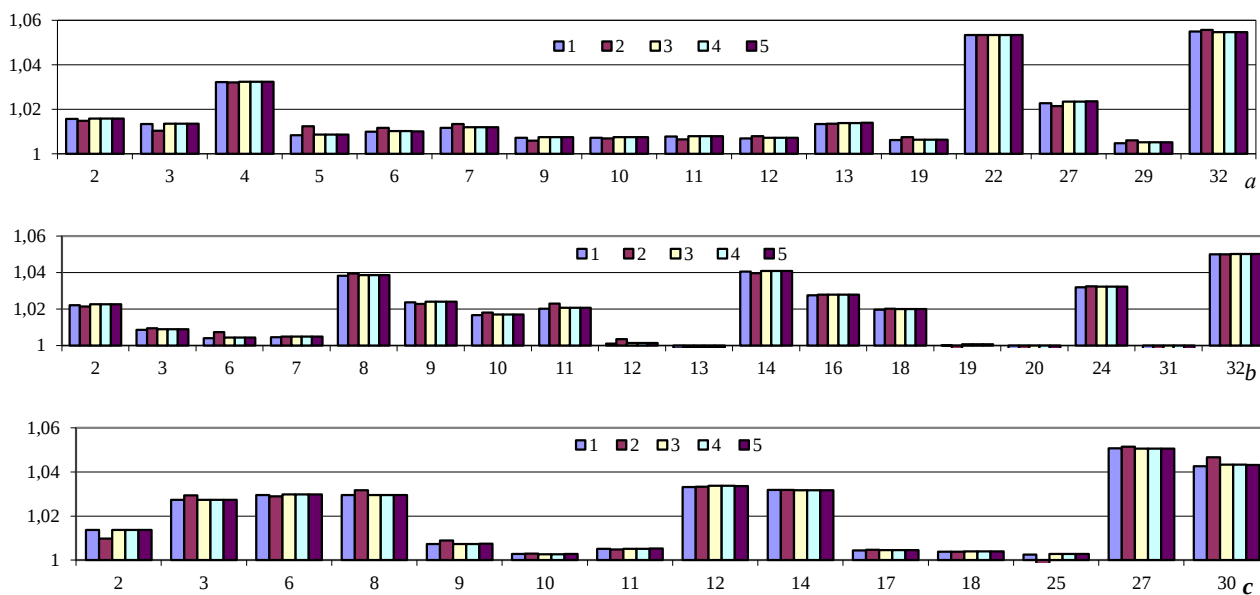
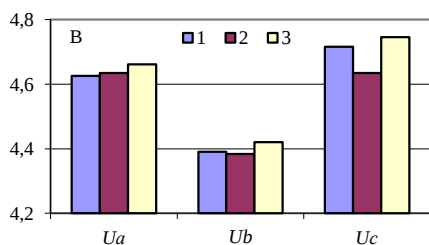
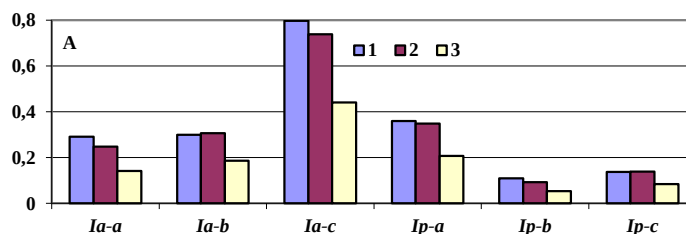


Рис. 3. Относительные значения продольных составляющих напряжений в узлах с измеренными напряжениями в фазах a , b , c : 1 – точные значения; 2 – измеренные значения; 3, 4, 5 – оценки напряжений, полученные методом взвешенных наименьших квадратов без и с ограничениями, методом матрицы Хечтела

Fig. 3. Relative values of direct-axis components of voltages in the nodes with the measured voltages in phases a , b , c : 1 – accurate values; 2 – measured values; 3, 4, 5 – voltage estimates obtained by the weighted least squares method with and without constraints by the Hachtel matrix method



(1)



(2)

Рис. 4. Суммарные значения абсолютных значений остатков в фазах a , b , c для продольных составляющих напряжений (1) и активной I_a и реактивной I_p составляющих узловых токов (2), полученных для трех методов

Fig. 4. Total absolute values of residuals in the phases a , b , c for direct-axis components of voltages (1) and active I_a and reactive I_p components of nodal currents (2) obtained for the three methods



Из рис. 4 также следует, что суммарные остатки (2) для активной и реактивной составляющих узловых токов являются наибольшими для метода взвешенных наименьших квадратов и наименьшими для метода матрицы Хечтела, однако и для токов разница суммарных остатков не превышает 0.36 А, что не позволяет в общем случае сделать вывод о наиболее эффективном методе.

В таблице для каждой фазы приведены значения целевой функции суммы взвешенных остатков на простых итерациях нелинейного оценивания состояния по измерениям активных и реактивных узловых мощностей и модулей узловых напряжений. При моделировании измерений в тестовые значения активных и реактивных мощностей для 14-го часа суточного графика узловых мощностей вносились погрешности, среднеквадратические отклонения которых задавались 0.12 ВА, а для напряжений – 0.4 В.

Анализ результатов, приведенных в таблице, позволил отдать предпочтение методу матрицы Хечтела, который далее

используется при решении проблемы нелинейного оценивания состояния для каждого часа суточного графика изменения узловых мощностей.

На рис. 5 для каждой фазы тестовой сети показаны оценки активных узловых мощностей и продольных составляющих напряжений в относительных единицах, полученные в результате нелинейного оценивания состояния с использованием метода матрицы Хечтела. Оценки узловых мощностей позволяют определить часы, в которые нагрузочные узлы, имеющие и нагрузку, и генерацию, становятся генераторными. Оценки узловых напряжений позволяют определить в каждой фазе узлы, в которых можно ожидать нарушение верхних или нижних допустимых пределов на отклонения напряжений. Например, в фазе *a* перенапряжения могут возникнуть в узлах 14, 22 и 32, а в 30-м узле фазы *c* в 21–23 часа могут появиться недопустимые провалы напряжения; нагрузочный узел 4 фазы *a* с 9 по 18 часов становится генераторным.

Изменения целевой функции суммы взвешенных остатков на простых итерациях нелинейного оценивания состояния, выполняемых методами: взвешенных наименьших квадратов без ограничений (1), с ограничениями (2), матрицы Хечтела (3)
Variations of the objective function of the sum of weighted residuals at the simple iterations of nonlinear state estimation performed by the methods of weighted least squares without constraints (1), weighted least squares with constraints (2), Hachtel matrix (3)

Значения целевой функции $J(u)$ / Values of the objective function									
Фаза / Phase	<i>a</i>			<i>b</i>			<i>c</i>		
Итерация / Iteration	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1352.42	1338.44	1352.38	1284.77	1412.204	1284.29	1219.38	1212.10	1219.15
2	13.16	15.56	13.12	29.97	95.744	28.90	18.6	31.71	18.16
3	12.57	14.54	12.54	28.72	93.73	27.67	17.75	30.50	17.55
4	–	–	–	28.73	93.73	27.66	–	–	–

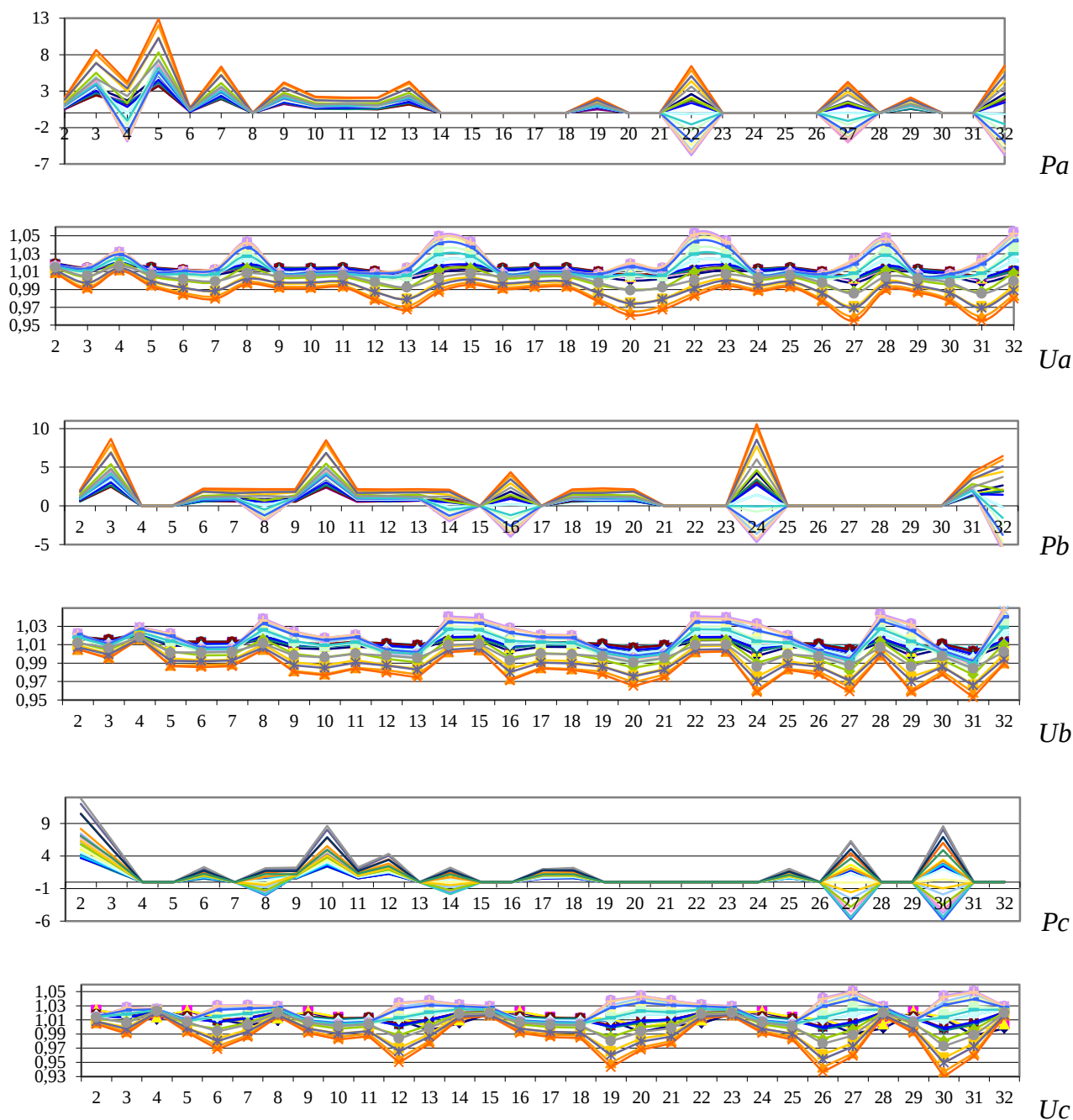


Рис. 5. Оценки активных узловых мощностей P_a, P_b, P_c и продольных составляющих напряжений U_a, U_b, U_c в фазах a, b, c распределительной сети в течение суток

Fig. 5. Estimates of active nodal powers P_a, P_b, P_c and direct-axis components of voltage U_a, U_b, U_c in phases a, b, c of the distribution network within 24 hours

Выводы

Главным результатом, эффективность которого подтверждена проведенными расчетами, является использование для нелинейного ОС распределительной сети по SM, включающим измерения узловых мощностей, метода простой итерации, на

каждом шаге которого решается линейная система уравнений с переопределенной матрицей.

Экспериментально доказано преимущество метода матрицы Хечтела для решения линейной системы уравнений из-



мерений по сравнению с методом наименьших квадратов с ограничениями и без ограничений на нулевые токи в транзитных узлах.

Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.2. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310438-1.

Библиографический список

1. Schweppe F.C., Wildes J. Power system static-state estimation, Part I: Exact model // *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*. 1970. Pas-89. No. 1. P. 120–125. DOI: 10.1109/TPAS.1970.292678
2. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
3. Войтов О.Н., Голуб И.И., Семенова Л.В. Алгоритм определения потерь энергии в электрических сетях // *Электричество*. 2010. № 9. С. 38–45.
4. Emmanuel M., Rayudu R. Communication technologies for smart grid applications: a survey // *Journal of Network and Computer Applications*. 2016. No. 74. P. 133–148. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.08.012
5. Santos S., Llano A., Arzuaga A., Arzuaga T., Marron L., Zamalloa M. Smart meters enable synchrophasor applications in distribution grids // *CIGRE (Paris, August 2012)*. Paris, 2012. 8 p.
6. Alimardani A., Therrien F., Atanackovic D., Jatskevich J., Vaahedi E. Distribution system state estimation based on nonsynchronized smart meters // *IEEE Trans. Smart Grid*. 2015. Vol. 6. Issue 6. P. 2919–2928. DOI: 10.1109/TSG.2015.2429640
7. Primadianto A., Lu C. A review on distribution system state estimation // *IEEE Trans. Power Syst.* 2017. Vol. 32. Issue 5. P. 3875–3883. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2632156
8. Ciric R.M., Feltrin A.P., Ochoa L.F. Power Flow in four-wire distribution networks – General Approach // *IEEE Trans. Power Syst.* 2003. Vol. 18. Issue 4. P. 1283–1290. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.818597
9. Гамм А.З., Голуб И.И., Кесельман Д.Я. Наблюдаемость электроэнергетических систем // *Электричество*. 1975. № 1. С. 12–18.
10. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. М.: Наука, 1990. 200 с.
11. Aschmoneit F.C., Peterson N.M., Adrian E.C. State estimation with equality constraints // *Tenth PICA Conference Proceedings (Toronto, May 1977)*. Toronto, 1977. P. 427–430.
12. Gjelsvik A., Aam S., Holten L. Hachtel's augmented matrix method – a rapid method improving numerical stability in power system static state estimation // *Trans. Power Apparatus and Systems*. 1985. Pas-104, No. 11. P. 2987–2993. DOI: 10.1109/TPAS.1985.318939
13. Olivala P.C., Madureira A.G., Matos M. Advanced voltage control for smart microgrids using distributed energy resources // *Electric Power Systems Research*. 2017. Vol. 146. P. 132–140. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.01.027

References

1. Schweppe F.C., Wildes J. Power system static-state estimation, Part I: Exact model. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*. 1970, pas-89, no. 1, pp. 120–125. DOI: 10.1109/TPAS.1970.292678
2. Gamm A.Z. *Statisticheskie metody otsenivaniia sostoiianiia elektroenergeticheskikh system* [Statistical estimation methods for electric power system states]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 220 p. (In Russian).
3. Voitov O.N., Golub O.I., Semenova L.V. Algorithms for energy losses determination in electric networks. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2010, no. 9, pp. 38–45. (In Russian).
4. Emmanuel M., Rayudu R. Communication technologies for smart grid applications: a survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016, no. 74, pp. 133–148. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.08.012
5. Santos S., Llano A., Arzuaga A., Arzuaga T., Marron L., Zamalloa M. Smart meters enable synchrophasor applications in distribution grids. *CIGRE*. Paris, 2012, 8 p.
6. Alimardani A., Therrien F., Atanackovic D., Jatskevich J., Vaahedi E. Distribution system state estimation based on nonsynchronized smart meters. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2015, vol. 6, issue 6, pp. 2919–2928. DOI: 10.1109/TSG.2015.2429640
7. Primadianto A., Lu C. A review on distribution system state estimation. *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, vol. 32, issue 5, pp. 3875–3883. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2632156
8. Ciric R.M., Feltrin A.P., Ochoa L.F. Power Flow in four-wire distribution networks – General Approach. *IEEE Trans. Power Syst.* 2003, vol. 18, issue 4, pp. 1283–1290. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.818597
9. Gamm A.Z., Golub I.I., Keselman D. I.A. *Nabliudaemost elektroenergeticheskikh system* [Observability of electric power systems]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1975, no. 1, pp. 12–18. (In Russian).
10. Gamm A.Z., Golub I.I. *Nabliudaemost elektroenergeticheskikh system* [Observability of electric power systems]. Moscow: Nauka Publ., 1990, 200 p. (In Russian).
11. Aschmoneit F.C., Peterson N.M., Adrian E.C. State estimation with equality constraints. *Tenth PICA Conference Proceedings*. Toronto, 1977, pp. 427–430.
12. Gjelsvik A., Aam S., Holten L. Hachtel's augmented matrix method – a rapid method improving numerical stability in power system static state estimation. *Trans. Smart Grid*. 2015, vol. 6, issue 6, pp. 2919–2928. DOI: 10.1109/TSG.2015.2429640



Power Apparatus and Systems. 1985, pas-104, no. 11, pp. 2987–2993. DOI: 10.1109/TPAS.1985.318939
13. Olivala P.C, Madureira A.G., Matos M. Advanced voltage control for smart microgrids using distributed

energy resources. Electric Power Systems Research. 2017, vol. 146, pp. 132–140. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.01.027

Критерии авторства

Болоев Е.В., Голуб И.И., Федчишин В.В. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Boloev E.V., Golub I.I., Fedchishin V.V. 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-107-122>

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНОГО КОМПЛЕКСА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

© Г.Г. Константинов¹, Фам Конг Тао², В.И. Киселев³

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Российская Федерация, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

³ АО ПКБ "Интеллектуальные робастные интегрированные системы", Российская Федерация, 346410, г. Новочеркасск, ул. Дубовского, д. 15.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В работе представлена модель согласующего (управляющего) *DC/DC*-преобразователя, построенная из элементов библиотеки *SimPowerSystems MATLAB/Simulink* и исследование динамических свойств, а также способов управления *DC/DC*-преобразователем. **МЕТОДЫ.** Для достижения цели использовались методы моделирования режима понижения-повышения выходного напряжения преобразователя с двумя силовыми ключами, позволяющего существенно улучшить рабочие характеристики по сравнению с понижающе-повышающими преобразователями на основе одного силового ключа, а также традиционными преобразователями с двумя силовыми ключами. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложена модель и конструкция *DC/DC*-преобразователя с двумя силовыми ключами. Способ управления *DC/DC*-преобразователем на компьютерной модели. Рассматриваемый преобразователь имеет характеристики понижающе-повышающего преобразователя. **ВЫВОДЫ.** Выполнены исследования динамических свойств и найдены способы управления *DC/DC*-преобразователем на компьютерной модели. За счет разработки согласующего преобразователя энергии и принципов его управления появилась возможность стабилизировать емкость аккумуляторной батареи, повысить возможность маневрирования кораблей, подводных аппаратов (батискафы, необитаемые глубоководные аппараты и т.д.).

Ключевые слова: *DC/DC преобразователь, математическая модель, входное напряжение, понижающе-повышающий преобразователь.*

Информация о статье. Дата поступления 12 января 2018 г.; дата принятия к печати 24 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Константинов Г.Г., Фам Конг Тао, Киселев В.И. Компьютерная модель преобразователя для зарядно-разрядного комплекса аккумуляторных батарей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 107–122. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-107-122

COMPUTER MODEL OF A CONVERTER FOR THE STORAGE BATTERY CHARGE-DISCHARGE COMPLEX

G.G. Konstantinov, Pham Kong Tao, V.I. Kiselev

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

Platov South Russian State Polytechnic University,
132 Prosveshchenia St., Novocherkassk, Rostov Region 346428, Russian Federation

Design Bureau "IRIS" JSC,
15, Dubovsky St., Novocherkassk, 346410, Russian Federation.

ABSTRACT. PURPOSE. The paper presents the model of the *DC/DC* matching (controlling) converter built from the elements of the *SimPowerSystems MATLAB/Simulink* library, the study of dynamic properties and the methods to control the *DC/DC* converter. **METHODS.** The set purpose is achieved through the use of the modeling methods of the mode of step-down/up output voltage of the converter with two power switches, which allows significant improvement of operating performance as compared with buck – boost converters based on a single power switch, as well as with traditional converters with two power switches. **RESULTS.** A model and design of the *DC/DC* converter with two power switches is

¹Константинов Геннадий Григорьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электропривода и электрического транспорта, e-mail: kgg40@mail.ru

Gennady G. Konstantinov, Candidate of technical sciences, Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport, e-mail: kgg40@mail.ru

²Фам Конг Тао, аспирант, e-mail: Tao.phamcong@gmail.com

Fam Kong Tao, Postgraduate student, e-mail: Tao.phamcong@gmail.com

³Киселев Василий Иванович, технический директор, e-mail: kgg40@mail.ru

Vasily I. Kiselev, Technical Director, e-mail: kgg40@mail.ru



proposed as well as the control method of the DC/DC converter on a computer model. The converter under consideration has the characteristics of a buck – boost transformer. **CONCLUSIONS.** Having studied the dynamic properties, we found the methods to control a DC/DC converter on a computer model. The development of a matching energy converter and its control principles allowed to stabilize the battery capacity that resulted in improved possibility of maneuvering ships, submarines (bathyscaphes, unmanned deep-submergence vehicles, etc.).

Keywords: DC/DC converter, mathematical model, input voltage, buck - boost converter

Article info. Received January 12, 2018; accepted January 24, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Konstantinov G.G, Pham Kong Tao, Kiselev V.I. Computer model of a converter for the storage battery charge-discharge complex. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 107–122. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-107-122

Введение

Современный этап развития полупроводниковой техники и технологий преобразования электрической энергии позволяет конструировать зарядно-разрядный комплекс аккумуляторной батареи (ЗРК АКБ) с высокими удельными и энергетическими показателями и низким уровнем создаваемых электромагнитных помех. Лучшие массогабаритные показатели обусловлены возможностью повышения частоты преобразования до нескольких сотен килогерц при существенном снижении функциональной сложности силовых модулей и повышении их надежности [1–4]. Увеличение частоты преобразования дает возможность уменьшить массу индуктивных и емкостных компонентов ЗРК, вместе с тем предъявляет жесткие допуски к значениям параметров, определяющих их поведение в динамических режимах. К сложным проблемам относится также учет специфики освобождения активных зон полупроводниковых приборов от носителей тока при их запирании и поиск схемотехнических решений для снижения динамических потерь при пере-

ключении силовых элементов (мощных транзисторов), именуемых силовыми ключами в преобразовании токов DC/DC.

В связи с этим вопросы повышения коэффициента полезного действия (КПД)-комплекса путем уменьшения потерь при преобразовании энергии более чем актуальны. Пути решения этой проблемы известны – это снижение потерь в каждом звене электропривода (путем совершенствования конструкций этих звеньев) и согласование выходных параметров комплекса с параметрами нагрузки (путем регулирования частоты вращения и момента на выходе привода). Объектом исследования в данной работе является электромеханический комплекс, включающий DC/DC понижающе-повышающий преобразователь. DC/DC понижающе-повышающий преобразователь может работать в понижающем и в повышающем режиме для обеспечения требуемого напряжения в инверторе при большем изменении входного напряжения от 240 до 385 В.

Модели согласующего DC/DC-преобразователя

На рис. 1 показана модель DC/DC-преобразователя, построенная из элементов библиотеки *SimPowerSystems MATLAB/Simulink* [2]. По своей конфигурации она повторяет силовую схему рассмотренного ранее [1] двухзонного (повышающего/понижающего) преобразователя. Схема модели дополнена измерительными элементами (датчиками токов i_{D1} , i_L , i_{C2} , $i_{\text{наг}}$, датчиком напряжения $U_{\text{наг}}$), эле-

ментами визуализации результатов – виртуальными осциллографами *Scope ... Scope2*, блоком перемножения, вычисляющим мгновенное значение мощности нагрузки $P_{\text{наг}}$ и блоком ее цифровой индикации в кВт (Мощность $P_{\text{наг}}$).

В качестве активных элементов в модели на рис. 1 использованы блоки идеальных ключей Sw_1 и Sw_2 . Показана конфигурация для моделирования режима

понижения выходного напряжения – ключ Sw_2 постоянно закрыт, а ключ Sw_1 получает сигнал управления от блока ШИМ (*PWM Generator*) через демультиплексор *Demux*. Блок *PWM Generator* является многоканальным и позволяет управлять мостовыми схемами, содержащими от двух до 12 ключей. Используется минимальная конфигурация, управляющая двумя ключами одного плеча мостовой схемы. Выходной сигнал блока ШИМ содержит эти сигналы в виде вектора, а блок демультиплексора разделяет эти сигналы на два выхода. Поскольку блок *PWM Generator* использует в качестве сигнала несущей частоты треугольный график, изменяющийся от -1 до $+1$, для управления скважностью ШИМ на вход нужно подавать сигнал в диапазоне от -1 до $+1$. Для верхнего выхода нулевая длительность выходного импульса получается при задании $PWM_зад = -1$, а 100% длительность – при $PWM_зад = +1$. Для получения скважности ключа $\gamma_{зад}$ нужно подавать задание $PWM_зад = 2(\gamma_{зад} - 0,5)$.

Блок *Bus Selector* выделяет из выходной шины внутренних сигналов блока Sw_1 сигналы напряжения и тока ключа. При моделировании были заданы следующие значения параметров и величин: $R_{ип} = 0,01$ Ом, $C_1 = 40$ мкФ, $L = 560$ мкГн, $C_2 = 6 \cdot 5600$ мкФ, $R_{наг} = 0,73$ Ом, $E_{ип} = 240$ В, $PWM_зад = 0,33$ ($\gamma = 0,666$).

На рис. 2 показаны графики токов в ключе i_{Sw1} , диоде i_{D1} и индуктивности i_L , а на рис. 3 – графики выходного напряжения U_{C2} , тока i_{C2} и тока нагрузки i_R . Поскольку в блоках моделей емкостей C и индуктивностей L в библиотеке *SimPowerSystems* нет возможности задавать начальные значения соответственно напряжений и токов, а значение $PWM_зад = 0,33$ примерно соответствует минимальному рабочему напряжению на выходе DC/DC-преобразователя, то скачкообразное включение $E_{ип} = 240$ В приводит к значительным начальным броскам токов и перерегулированию в выходном напряжении. Следует заметить, что в реальной установке такого включения никогда не происходит, предусмотрен специальный режим медленного начального заряда конденсаторной батареи на выходе преобразователя.

Однако для последующего исследования реакций на скачки управляющих и возмущающих воздействий в рассматриваемом варианте модели такой режим увеличит общее время моделирования, требуемые объемы памяти.

К недостаткам модели следует отнести и то, что в токах i_{Sw1} и i_{D1} наблюдаются кратковременные импульсы, которые многократно превышают значения в проводящем состоянии (рис. 2, б).

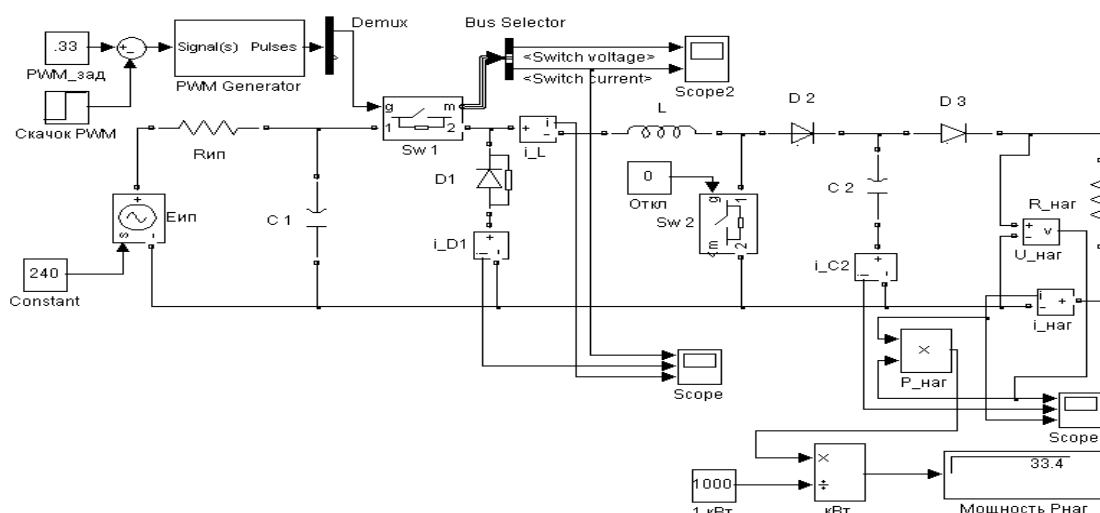


Рис. 1. Модель DC/DC-преобразователя

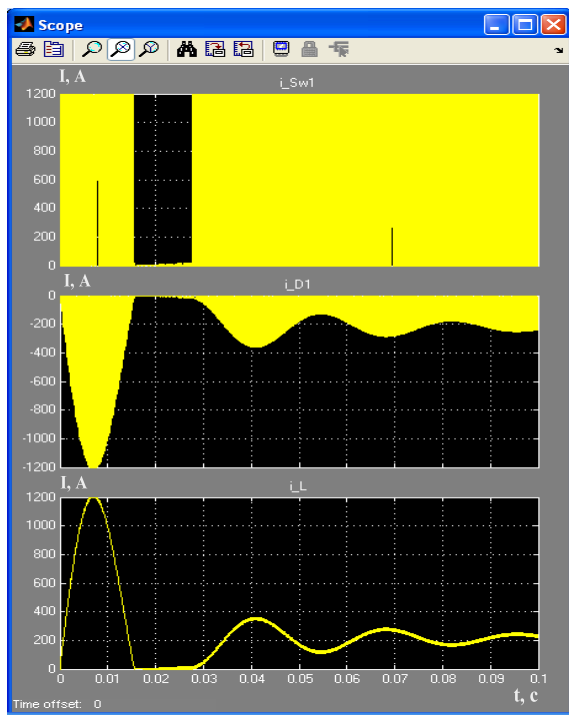
Fig. 1. Model of a DC/DC-converter

Более наглядно это видно на рис. 4, где в увеличенном масштабе времени показан фрагмент осциллограмм напряжения и тока ключа Sw_1 . Появление этих всплесков в моменты включения и отключения Sw_1 можно отнести к погрешностям численного интегрирования при выбранном методе расчета с переменным шагом и заданной относительной точности. Основная же причина в том, что в модели использованы блоки идеальных ключей, в параметрах которых (см. рис. 5) не задается время включения и отключения. Не устраняет всплески даже задание достаточно малого сопротивления и большой емкости снабберной цепи.

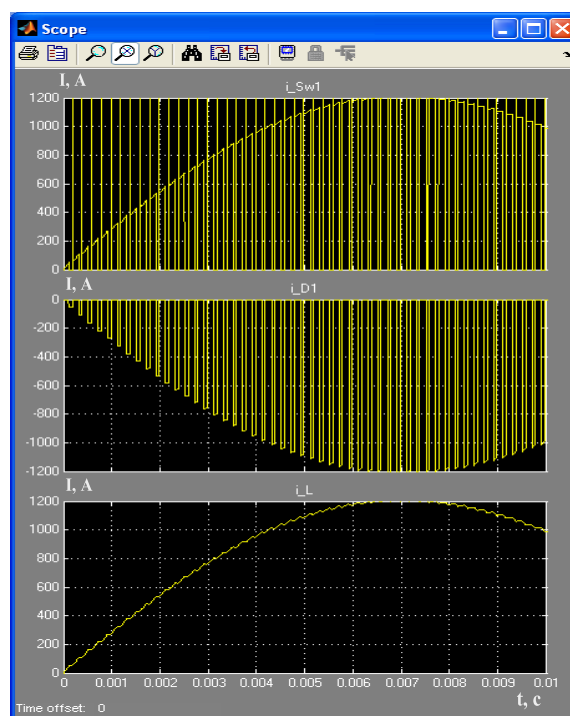
Замена в модели блоков идеальных ключей на блоки IGBT1 с параметрами, указанными на рис. 6, устраняет выявленный недостаток, о чем свидетельствуют осциллограммы рис. 7 и 8, однако при этом на порядок увеличивается время расчета.

Модель DC/DC -преобразователя для повышающего режима работы (рис. 9) отличается от рассмотренной ранее [1, 3] только постоянным включенным состоянием ключа IGBT1, подачей управляющих импульсов на затвор ключа IGBT2 и заменой сигналов в блоке осциллографа Scope на i_D2 и i_IGBT2 , а в блоке осциллографа Scope2 на u_IGBT2 и i_IGBT2 .

На рис. 10 показаны графики токов в ключе i_IGBT2 , диоде i_D2 и индуктивности i_L , а на рис. 11 – графики выходного напряжения u_C2 , тока i_C2 и тока нагрузки i_R при задании $PWM_зад = -0,5$, что примерно соответствует максимальному рабочему напряжению на выходе DC/DC -преобразователя при $E_{ип} = 240$ В. По сравнению с рис. 2 и 3 переходные процессы включения в режиме повышения напряжения затягиваются и имеют интервалы нулевого тока в индуктивности.



a



b

Рис. 2. Графики токов в ключе i_Sw1 , диоде i_D1 и индуктивности i_L (a); i_Sw1 и i_D1 наблюдаются кратковременные импульсы (b)

Fig. 2. Graphs of currents in the switch i_Sw1 , diode i_D1 and inductance i_L (a); i_Sw1 and i_D1 , short pulses are observed (b)

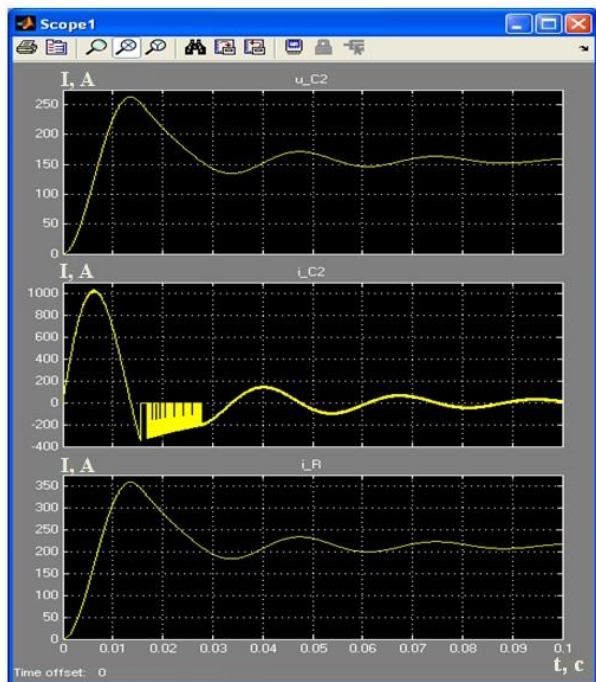


Рис. 3. Графики выходного напряжения U_{C2} , тока i_{C2} и тока i_R
Fig. 3. Graphs of output voltage U_{C2} , current i_{C2} and current i_R

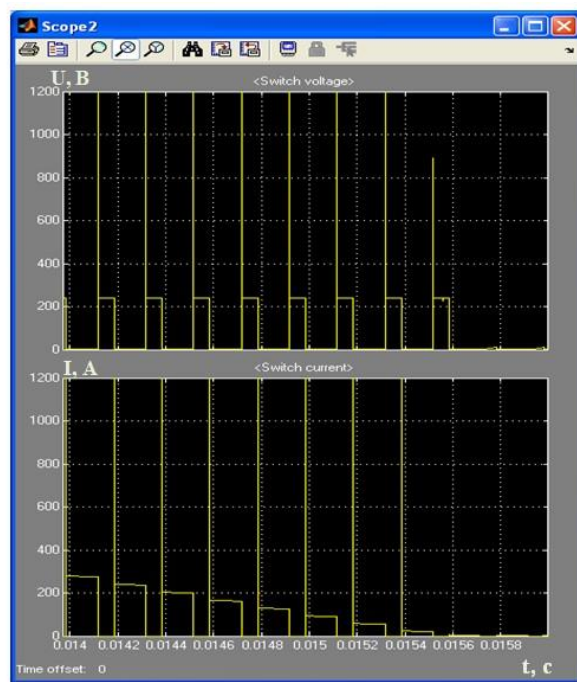


Рис. 4. Фрагмент осциллограмм напряжения и тока Sw_1
Fig. 4. Fragment of voltage and current oscillograms of Sw_1

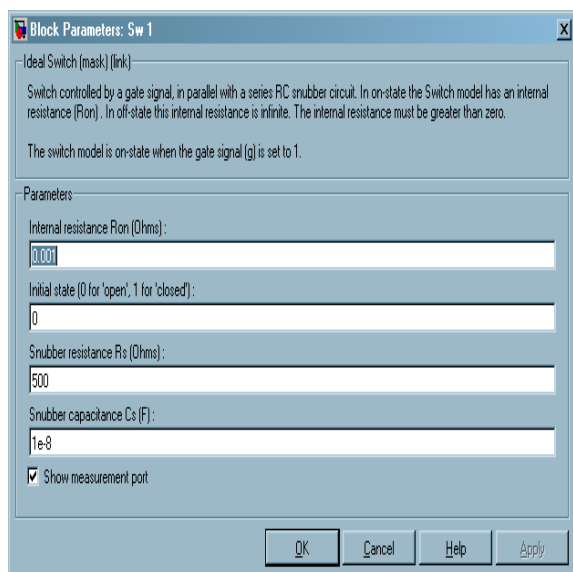


Рис. 5. Параметры ключа Sw_1 не задается время включения и отключения
Fig. 5. Parameters of the switch Sw_1 do not set on and off times

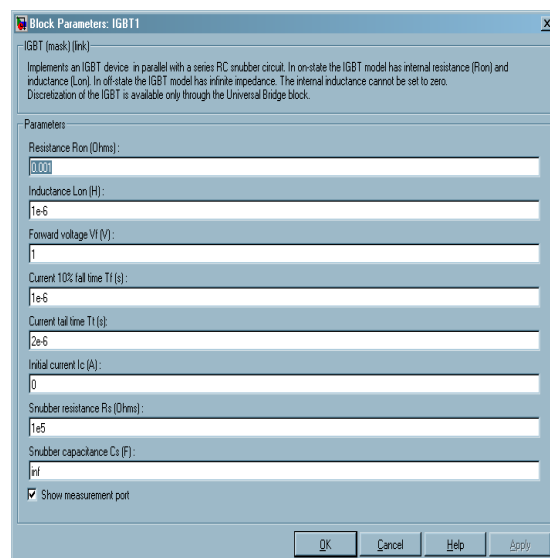


Рис. 6. Параметры ключа Sw_1 задается время включения и отключения
Fig. 6. Parameters of the switch Sw_1 set on and off times

Следует также заметить, что в сигнале напряжения U_{IGBT2} (рис. 12) вновь появляются всплески в моменты коммутации транзистора, для устранения которых

можно было бы скорректировать значения параметров снабберной цепи и заданной точности решения, однако это в еще большей степени увеличило бы время расчета.

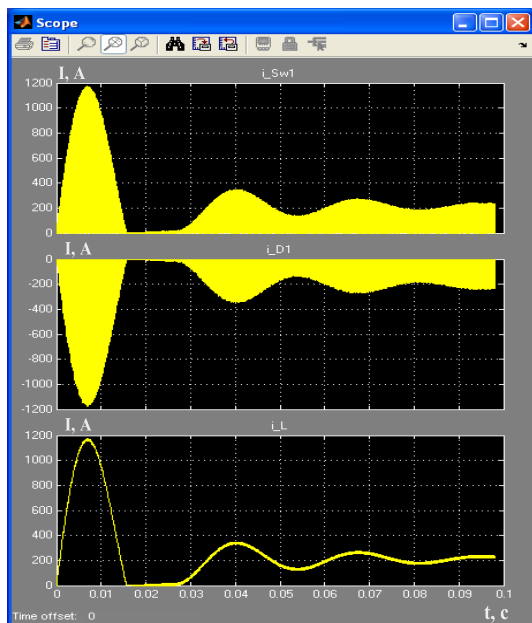


Рис. 7. Осциллограммы i_{Sw1} , i_{D1} и i_L при замене в модели блоков идеальных ключей на блоки IGBT1 с параметрами, указанными на рис. 6

Fig. 7. Oscillograms i_{Sw1} , i_{D1} and i_L when replacing ideal switch blocks in the model with IGBT1 blocks with the parameters indicated in Fig. 6

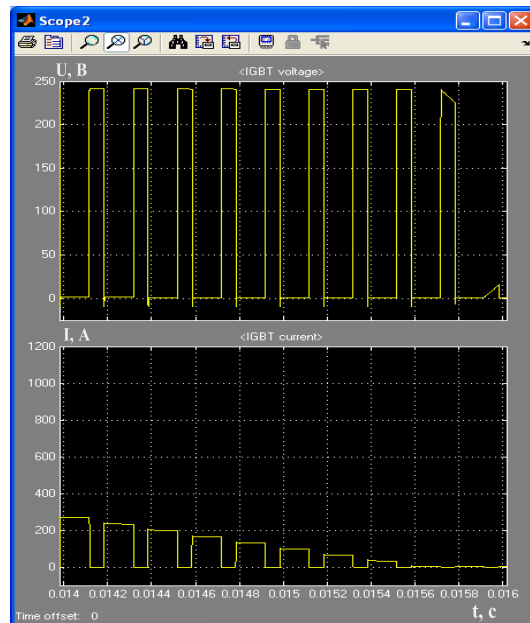


Рис. 8. Фрагмент осциллограмм напряжения и тока в ключе Sw_1 при замене в модели блоков идеальных ключей на блоки IGBT1 с параметрами, указанными на рис. 6

Fig. 8. Fragment of oscillograms of voltage and current in the switch Sw_1 when replacing the ideal switch blocks in the model with IGBT1 blocks with the parameters indicated in Fig. 6

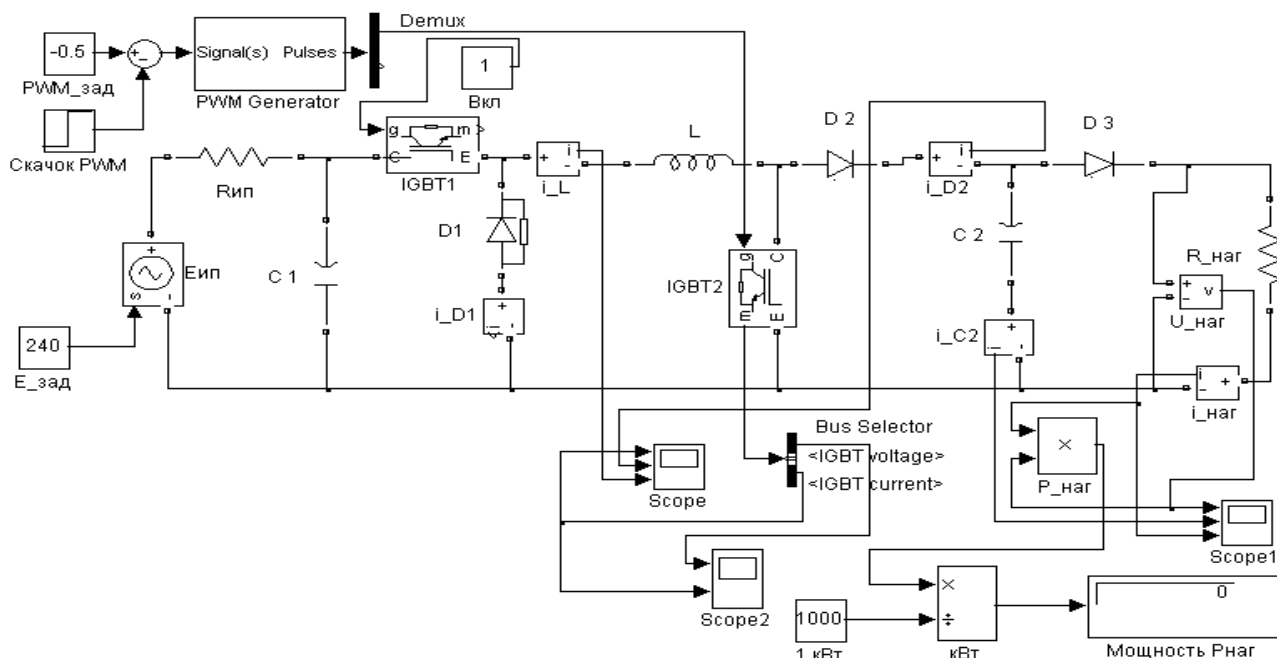


Рис. 9. Модель DC/DC-преобразователя для повышающего режима работы
Fig. 9. Model of the DC/DC-converter for step-up operation mode

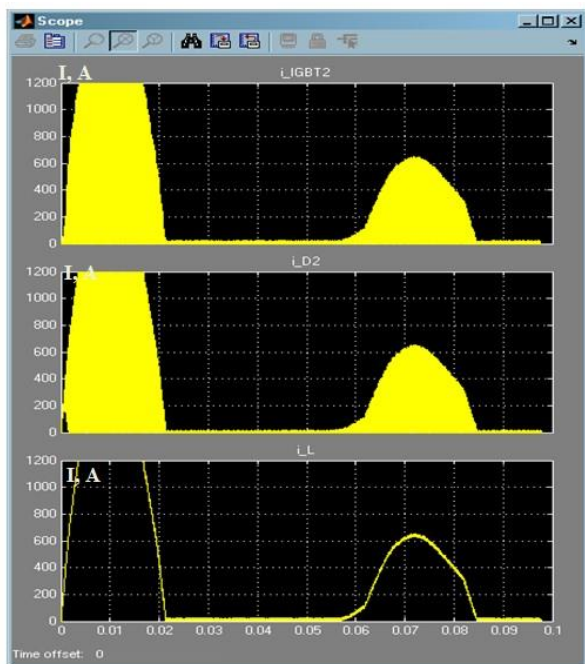


Рис. 10. Графики токов в IGBT2, D2 и L при $PWM_{\text{зад}} = 0,5$ и $E_{\text{un}} = 240 \text{ В}$
Fig. 10. Graphs of currents in IGBT2, D2 and L under $PWM_{\text{set}} = 0,5$ and $E_{\text{un}} = 240 \text{ V}$

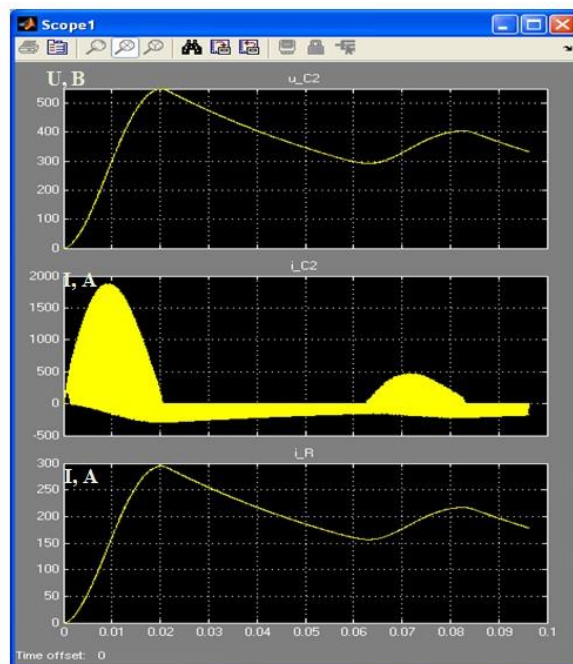


Рис. 11. Графики u_{C2} , i_{C2} и i_R при $PWM_{\text{зад}} = 0,5$ и $E_{\text{un}} = 240 \text{ В}$
Fig. 11. Graphs of u_{C2} , i_{C2} and i_R under $PWM_{\text{set}} = 0,5$ and $E_{\text{un}} = 240 \text{ V}$

Для исключения из расчетов начального переходного процесса включения DC/DC -преобразователя в схему модели вместо конденсатора C2 был введен блок маскируемой подсистемы конденсатор_2 (рис. 13), которая состоит из блоков масштабирующего коэффициента $1/C$, ин-

тегратора и управляемого источника напряжения U_C . На вход 1 подается внешний сигнал тока конденсатора i_C , на вход 2 – значение начального напряжения u_{C0} . Подсистема имеет два коннектора $+U_C$ и $-U_C$ для подключения к внешней цепи.

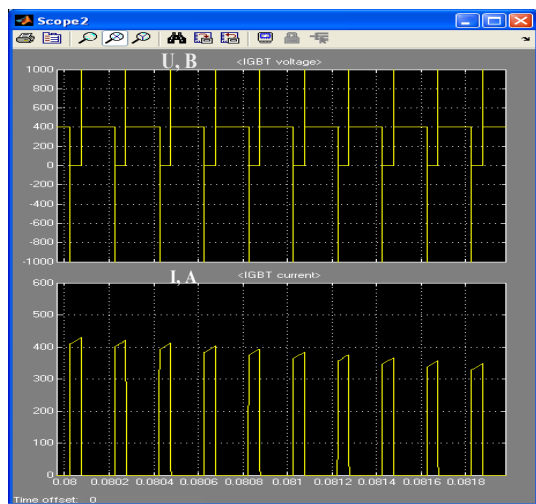


Рис. 12. Сигнал напряжения и тока IGBT2
Fig. 12. Signal of voltage and current IGBT2

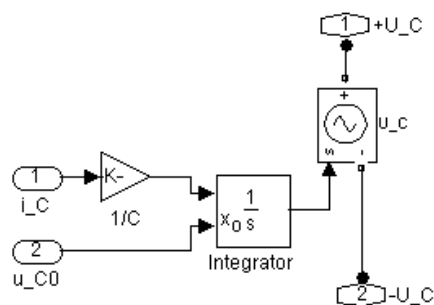


Рис. 13. Блок маскируемой подсистемы конденсатор_2
Fig. 13. Block of the masked subsystem – capacitor_2

Параметр маски C задает значение емкости. Модифицированная схема модели DC/DC-преобразователя показана на рис. 14. В ней на вход i_C блока конденсатор_2 подается алгебраическая сумма втекающих и вытекающих токов $i_C = i_{D2} - i_{наг}$, а начальное значение напряжения на конденсаторе задается в блоке $U_{C2_нач}$. В модель вместо блока индуктивности L была введена маскируемая подсистема – индуктивность – с двумя коннекторами

($-i_L$ и $+i_L$) для подключения к внешней цепи и входом i_{L0} задания начального значения тока (рис. 14).

Подсистема построена аналогично подсистеме конденсатор, но имеет внутренний датчик напряжения и внутренний управляемый источник тока, подключенные непосредственно к коннекторам, и параметр L , задающий значение индуктивности, а, следовательно, и масштабирующий коэффициент на входе интегратора.

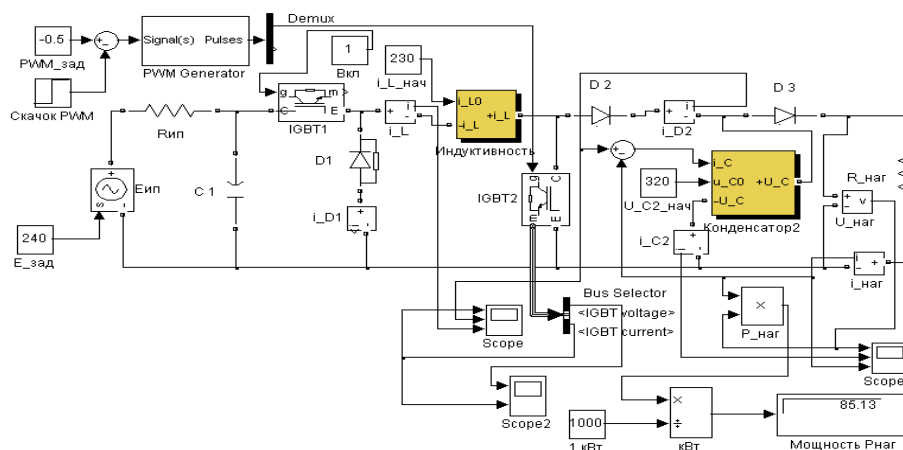


Рис. 14. Модель DC/DC-преобразователя при блоке индуктивности L была введена маскируемая подсистема – индуктивность с двумя коннекторами ($-i_L$ и $+i_L$)

Fig. 14. Model of the DC/DC-converter. Inductance block L is replaced with the masked inductance subsystem with two connectors ($-i_L$ and $+i_L$)

Исследование динамических свойств и способов управления DC/DC-преобразователем на компьютерной модели

Управление DC/DC-преобразователем производится сигналом PWM_зад, поступающим на вход блока PWM Generator через блок Ограничение, введенный в модель для ограничения управляющего воздействия в пределах ± 1 .

Оценка динамических свойств DC/DC-преобразователя производилась по осциллограммам переходных процессов при скачках управляющего воздействия PWM_зад и сопротивления нагрузки $R_{наг}$ как в режиме понижения, так и в режиме повышения выходного напряжения. На рис. 15 приведена осциллограмма токов i_{Sw1} , i_{D1} и i_L при изменении PWM_зад от начального значения 0,333 до нуля, то есть

уменьшения скважности $Sw1$ до 50%. Отработка скачка управляющего воздействия носит колебательный характер со средней степенью затухания. При заданных значениях $L = 560$ мкГн, $C_2 = 6 \cdot 5600$ мкФ период собственных колебаний $T_0 = 2\pi\sqrt{LC} = 27$ мс, что хорошо согласуется с периодом колебаний на рис. 15. Однако уменьшение скважности приводит в модели к спаданию токов до отрицательных значений, чего не может быть в реальной схеме из-за наличия диодов $D1$ и $D2$. Для устранения выявленного недостатка в модель был введен дополнительный переключатель u_{Sw2a} , управляемый значением тока i_L и отключающий сигнал напряжения u_{C2} от входа



сумматора в цепь моделирования индуктивности (рис. 16). Для устранения «зависания» расчета в момент достижения током i_L нулевого значения в параметрах блока u_Sw2a принудительно было задано время

дискретизации $Sample\ time = 1e-5$ с. После этого переходный процесс (рис. 17 и 18) качественно почти не изменился за исключением начального участка и уменьшения амплитуд колебаний.

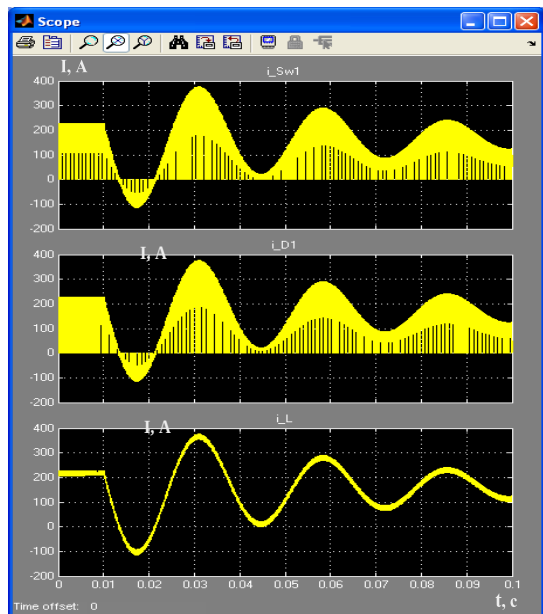


Рис. 15. Осциллограмма токов i_{Sw1} , i_{D1} и i_L при PWM_зад от 0,333 до нуля
Fig. 15. Oscillogram of currents i_{Sw1} , i_{D1} and i_L under PWM_set from 0.333 to zero

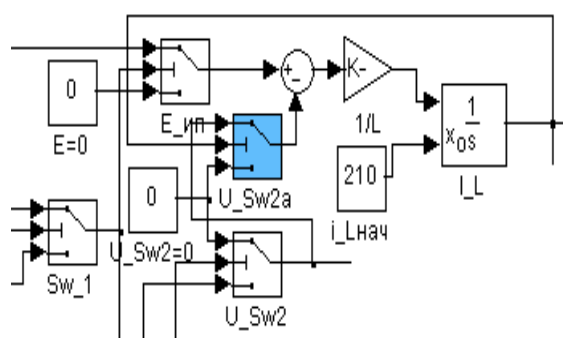


Рис. 16. Параметры блока u_Sw2a
Fig. 16. Parameters of the block u_Sw2a

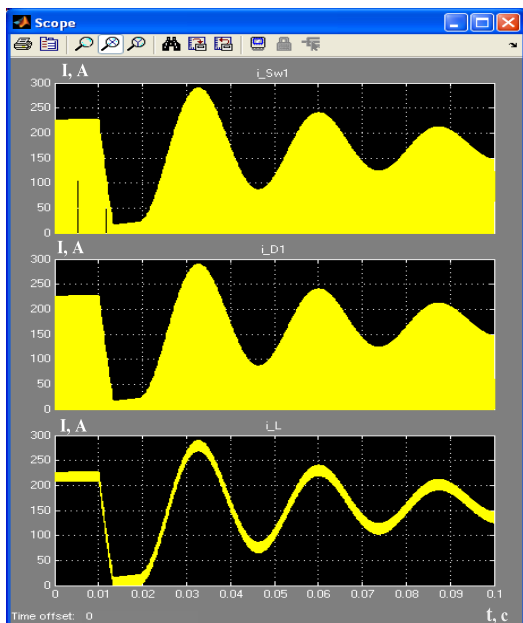


Рис. 17. Осциллограммы токов i_{Sw1} , i_{D1} и i_L при понижении напряжения
Fig. 17. Oscillograms of currents i_{Sw1} , i_{D1} and i_L under voltage bucking

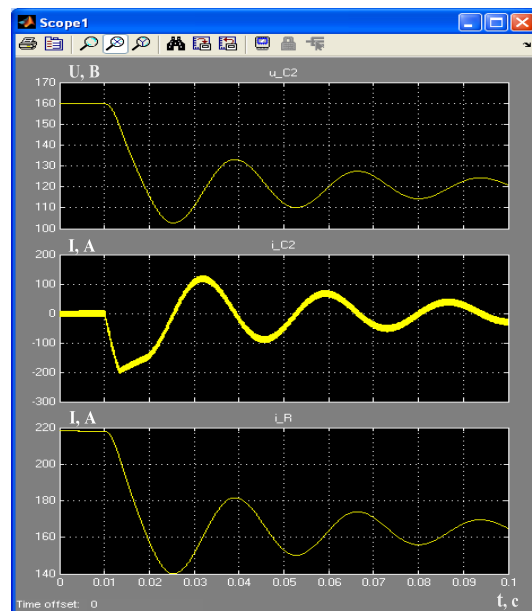


Рис. 18. Осциллограммы U_{C2} , i_{C2} и i_R при понижении напряжения
Fig. 18. Oscillograms of U_{C2} , i_{C2} and i_R under voltage bucking



На рис. 19 и 20 приведены осциллограммы для работы в режиме повышения напряжения при изменении PWM_зад от начального значения -0,5 до -0,8, то есть уменьшения скважности Sw2 с 25 до 10% при $R_{наг} = 1,86 \text{ Ом}$ и задании начальных условий $i_{L0} = 220 \text{ А}$, $U_{C2_нач} = 320 \text{ В}$. Это уменьшает установившееся напряжение на нагрузке до 267 В.

Характер переходных процессов аналогичен рассмотренному ранее режиму понижения напряжения (рис. 17 и 18).

Значительное перерегулирование и слабое демпфирование колебаний в реакции DC/DC-преобразователя с разомкнутой системой управления указывают на необходимость применения замкнутых систем управления и разработки алгоритмов управления, адекватных объекту. Кроме того, следует учесть, что применение одного ШИМ-генератора для управления двумя ключами DC/DC-преобразователя вызывает определенные трудности при переходе из режима понижения в режим повышения напряжения и обратно. Для получения граничного выходного напряжения

$U_{наг} = E_{ип}$ в режиме понижения требуется ШИМ = 100% (подавать PWM_зад = -1), а в режиме повышения требуется ШИМ = 0% (PWM_зад = -1), то есть скачком менять сигнал задания.

Для реализации модели с замкнутой системой регулирования и упрощения схемы, реализующей переход между режимами повышения и понижения напряжения в модели (рис. 21) применены два блока PWM Generator и радикально изменена схема формирования управляющих сигналов PWM_зад1 и PWM_зад2. Задание напряжения на выходе преобразователя $U_{зад}$ и сигнал обратной связи по напряжению U_{C2} поступают на вход блока PID Контроллер, выход которого через масштабирующий множитель, блоки ограничения сигнала и сумматоры формирует требуемые управляющие сигналы. Предполагается, что рабочий диапазон выходного сигнала PID составляет 0...2, причем зона PID = 0...1 управляет изменением сигнала PWM_зад1 в пределах -1...+1 при PWM_зад2 = -1, а зона PID = 1...2 управляет изменением сигнала PWM_зад2

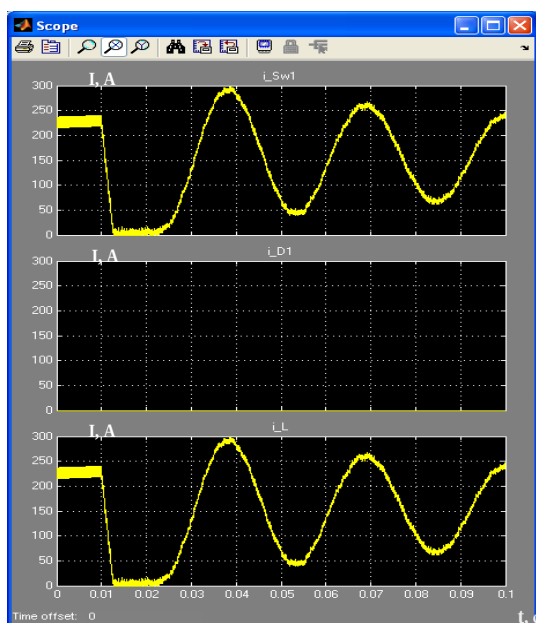


Рис. 19. Осциллограммы токов i_{Sw1} , i_{D1} , i_L при изменении PWM_зад от -0,5 до -0,8

Fig. 19. Oscillograms of currents i_{Sw1} , i_{D1} , i_L under PWM_зад changes from -0.5 to -0.8

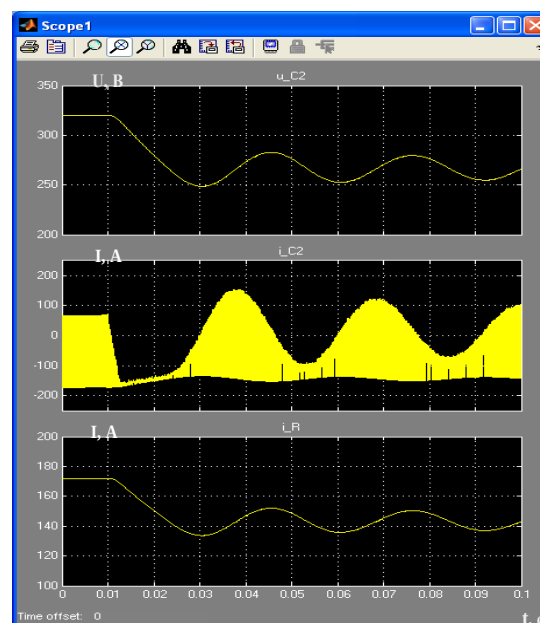


Рис. 20. Осциллограммы U_{C2} , i_{C2} и i_R при изменении PWM_зад от -0,5 до -0,8

Fig. 20. Oscillograms of U_{C2} , i_{C2} and i_R under PWM_зад changes from -0.5 to -0.8

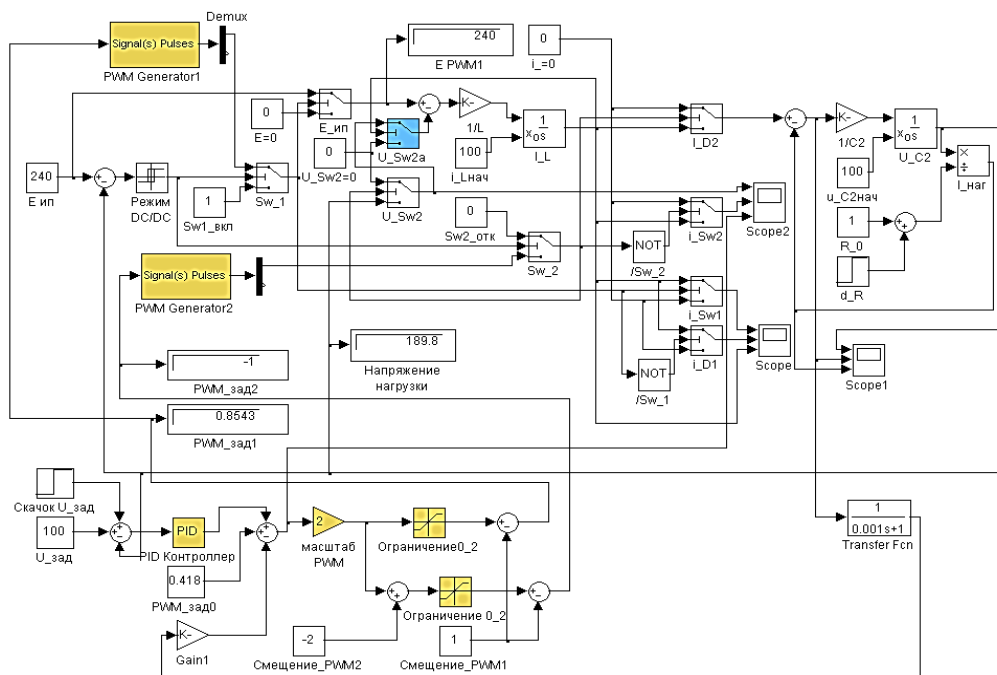


Рис. 21. Модель DC/DC-преобразователя при использовании 2 блока PWM Generator
Fig. 21. DC / DC-converter model when using two PWM Generator blocks

в пределах $-1...+1$ при $PWM_зад1 = 1$. Умножение сигнала PID на масштаб $PWM = 2$, последующее ограничение на уровнях 0 или 2 и вычитание Смещение_PWM1 = 1 согласует пределы рабочего диапазона сигнала PID с диапазоном $-1...+1$ входных сигналов блоков PWM Generator. Для канала PWM_зад2 до ограничения вычитается Смещение_PWM2 = 2, что разделяет зоны действия сигналов PWM_зад1 и PWM_зад2.

Добавление к сигналу PID константы PWM_зад0 позволяет имитировать начальное значение интегральной части PID контроллера.

На рис. 22 и 23 приведены осциллограммы для работы системы с П-регулятором в режиме понижения напряжения при изменении $U_{зад}$ от начального значения 100 В до 110 В при $t = 0,01$ с за счет блока Скачок $U_{зад}$. Они получены при $R_{наг} = 1$ Ом и задании начальных условий $PWM_зад0 = 0,418$, $i_{Lнач} = 100$ А, $U_{C2нач} = 100$ В. Коэффициент передачи пропорциональной части PID $K_{пр} = 0,05$ совместно с коэффициентом передачи объекта управления $K_{ou} = 100/0,418 = 240$ и единичном коэффициенте обратной свя-

зи обеспечивает достаточно большой общий коэффициент передачи контура регулирования $K_{общ} = K_{пр} K_{ou} = 12$. Отрицательная обратная связь по напряжению нагрузки примерно в 3,5 раза уменьшает период колебаний, но не уменьшает колебательности системы, а наоборот, увеличивает ее, если в качестве показателя затухания использовать отношение двух соседних амплитуд. Из рис. 23 видно, что скачок задания в 10 В при заданном значении $K_{пр}$ вызывает изменение выхода регулятора U_{PID} почти в полном диапазоне изменения ШИМ для Sw1 за время первого колебания и это вызывает примерно трехкратный бросок тока в индуктивности и почти двойное перерегулирование в изменении $U_{наг}$ относительно приращения установившегося значения.

На рис. 24 и 25 приведены осциллограммы работы системы с П-регулятором при тех же параметрах и начальных значениях, но при отработке десятикратно увеличенного скачка задания. Это увеличивает первый бросок выхода регулятора U_{PID} до 5,5, но реально действующее значение ограничивается на уровне 1. Поэтому амплитуда первого броска тока i_L увеличи-



вадается не в 10 раз по сравнению с рис. 22, хотя и составляет более 1100 А. Это приводит к нарастанию выходного напряжения до заданного значения $U_{\text{зад}} = 200$ В примерно за 6 мс, затем происходит резкое

спадание тока до нуля и бестоковая пауза на примерно такое же время. Далее возникают колебания с амплитудой, вдвое превышающей амплитуду на рис. 22.

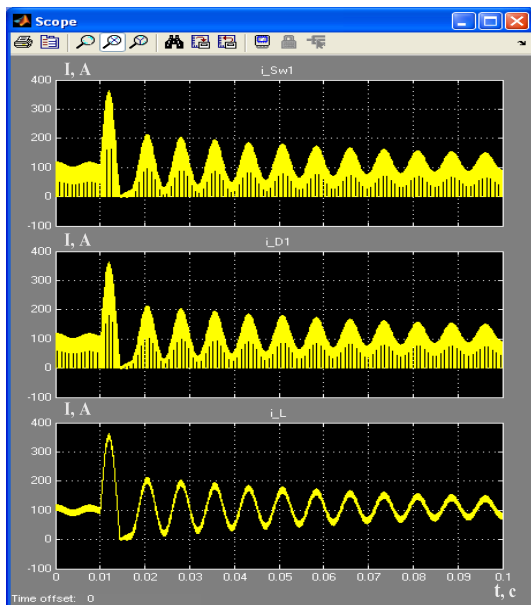


Рис. 22. Осциллограммы токов i_{Sw1} , i_{D1} и i_{L} при изменении $U_{\text{зад}}$ от 100 В до 110 В
Fig. 22. Oscillograms of currents i_{Sw1} , i_{D1} and i_{L} under $U_{\text{зад}}$ variation from 100 V to 110 V

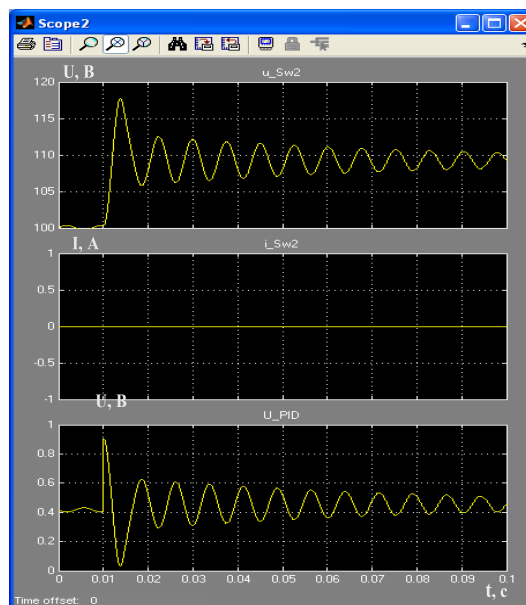


Рис. 23. Осциллограммы U_{Sw2} , i_{Sw2} и U_{PID} при изменении $U_{\text{зад}}$ от 100 В до 110 В
Fig. 23. Oscillograms of U_{Sw2} , i_{Sw2} and U_{PID} under $U_{\text{зад}}$ variation from 100 V to 110 V

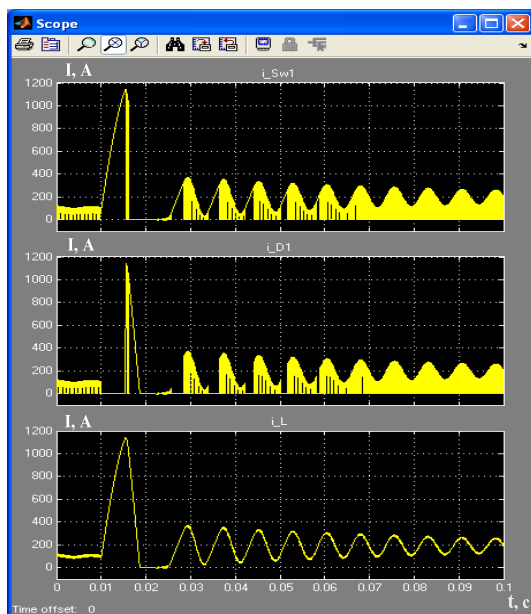


Рис. 24. Осциллограммы токов i_{Sw1} , i_{D1} и i_{L} с П-регулятором при тех же параметрах и начальных значениях
Fig. 24. Oscillograms of currents i_{Sw1} , i_{D1} and i_{L} with P-regulator for the same parameters and initial values

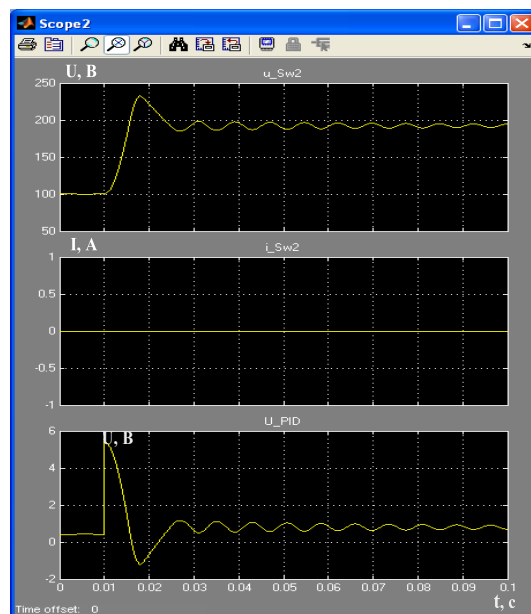


Рис. 25. Осциллограммы U_{Sw2} , i_{Sw2} и U_{PID} с П-регулятором при тех же параметрах и начальных значениях
Fig. 25. Oscillograms of U_{Sw2} , i_{Sw2} and U_{PID} with P-regulator for the same parameters and initial values



Поскольку объектом управления является звено второго порядка, для демпфирования колебаний в закон управления необходимо ввести отрицательную обратную связь по производной выходного напряжения. Это можно сделать за счет дифференциальной составляющей ПИД-регулятора, однако на практике это может уменьшить чувствительность к высокочастотным помехам.

Альтернативным вариантом может быть применение обратной связи по току, протекающему через конденсатор C2, поскольку этот ток пропорционален производной напряжения на конденсаторе. На рис. 26 и 27 приведены осциллограммы работы системы с П-регулятором при отработке скачка задания 10 В, при тех же параметрах и начальных значениях, но при введении в сигнал управления обратной связи по сигналу $i_{C2} = i_{D2} - i_{наг}$ с коэффициентом $K_{iC2} = 0,0025 \text{ 1/A}$. Посколь-

ку сигнал i_{C2} содержит переменную составляющую с частотой ШИМ, для ее подавления в цепь обратной связи введен Фильтр PWM, представленный инерционным звеном с постоянной времени 1 мс. Подбор значения K_{iC2} позволил получить график изменения выходного напряжения близкий по форме к оптимальному, однако при этом не удалось существенно уменьшить амплитуду первого броска токов (см. рис. 26 и 22), поскольку она определяется длительностью фронта нарастания U_{C2} и значением емкости C2.

Альтернативным вариантом управления может быть введение в ПД-регулятор интегральной составляющей и снижение быстродействия за счет перераспределения соотношения между пропорциональной и интегральной составляющими сигнала выхода регулятора в пользу интегральной части.

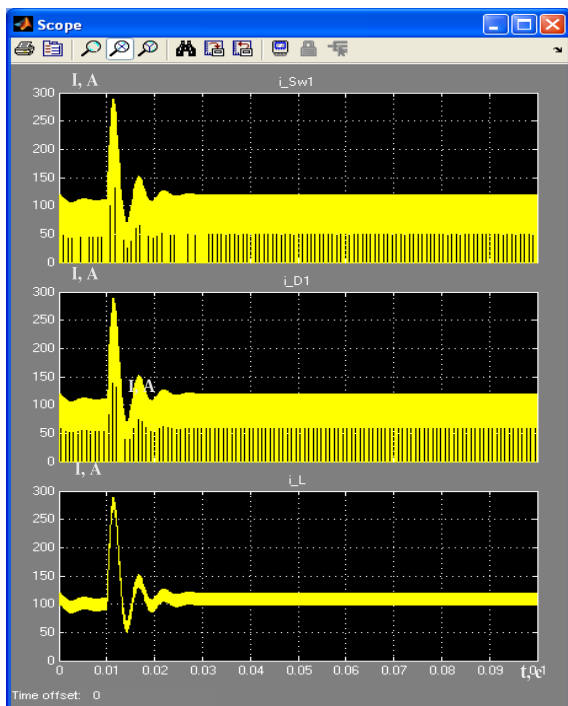


Рис. 26. Осциллограммы токов i_{Sw1} , i_{D1} и i_L П-регулятором при отработке скачка задания 10 В

Fig. 26. Oscillograms of currents i_{Sw1} , i_{D1} and i_L with a P-regulator under step response of a 10V reference jump

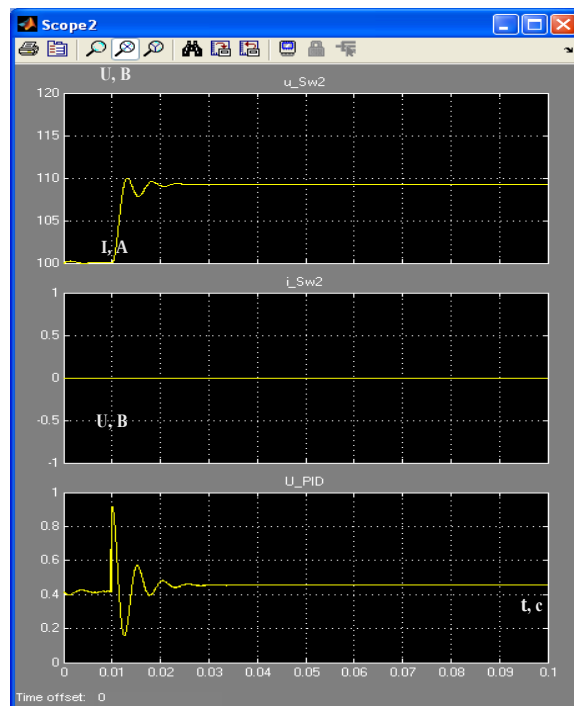


Рис. 27. Осциллограммы U_{Sw2} , i_{Sw2} и U_{PID} П-регулятором при отработке скачка задания 10 В

Fig. 27. Oscillograms of U_{Sw2} , i_{Sw2} and U_{PID} with a P-regulator under step response of a 10V reference jump

На рис. 28 и 29 приведены осциллограммы работы системы с ПИ-регулятором и обратной связи по току i_{C2} при отработке скачка задания 10 В. Выбран вариант настройки с $K_{пр} = 0,005$, $K_{ин} = 1$ с-1, $K_{iC2} = 0,0011/A$. За счет затягивания длительности фронта нарастания U_{C2} до 10 мс удалось вдвое уменьшить первый бросок токов. За счет уменьшения $K_{пр}$ в 10 раз по сравнению с предыдущей настройкой фактически исключены колебания, а перерегулирование не превышает 10%.

На рис. 30 и 31 приведены осциллограммы отработки возмущения в виде скачкообразного уменьшения сопротивления нагрузки до 0,5 Ом. Динамическая просадка напряжения U_{C2} не превышает 5% заданного значения, а броски токов 50% от разности установившихся значений.

Можно утверждать, что полученный вариант настройки параметров регулятора и обратной связи по току обеспечивает

близкий к оптимальному характер переходных процессов как при управляющем, так и при возмущающем воздействии. Комбинация из ПИ-регулятора и обратной связи по току конденсатора выходного фильтра позволяет гибко изменять длительность и качество переходных процессов. При задании конкретных требований по быстродействию и допустимым динамическим ошибкам значения параметров регулятора могут быть скорректированы для достижения заданных показателей.

Потери в преобразователях обусловлены потерями на проводимость в транзисторах и омическими потерями в дросселях. В предложенной модели и конструкции DC/DC преобразователя количество транзисторов и дросселей не изменилось по сравнению с базовой, поэтому и потери, а, следовательно, и коэффициент полезного действия остались на уровне базовой модели.

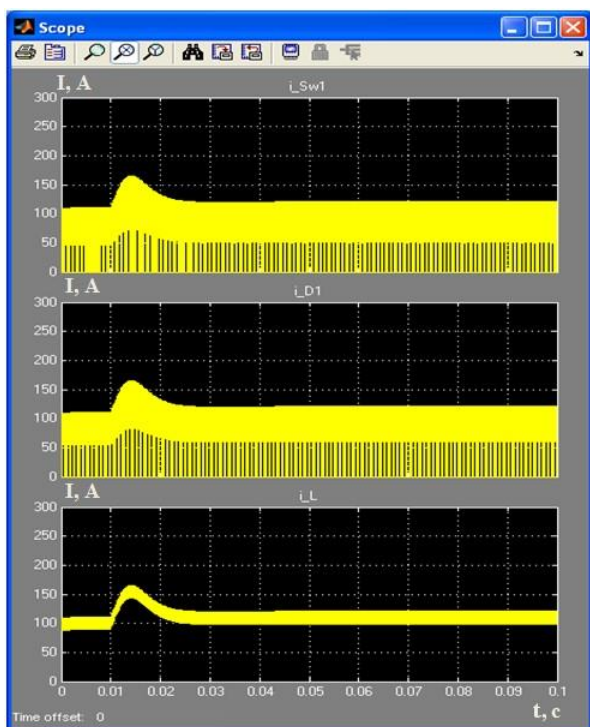


Рис. 28. Осциллограммы i_{Sw1} , i_{D1} и i_L с ПИ-регулятором и обратной связи по току i_{C2} при отработке скачка задания 10 В
Fig. 28. Oscillograms of i_{Sw1} , i_{D1} and i_L with PI controller and i_{C2} current feedback under step response of a 10V reference jump

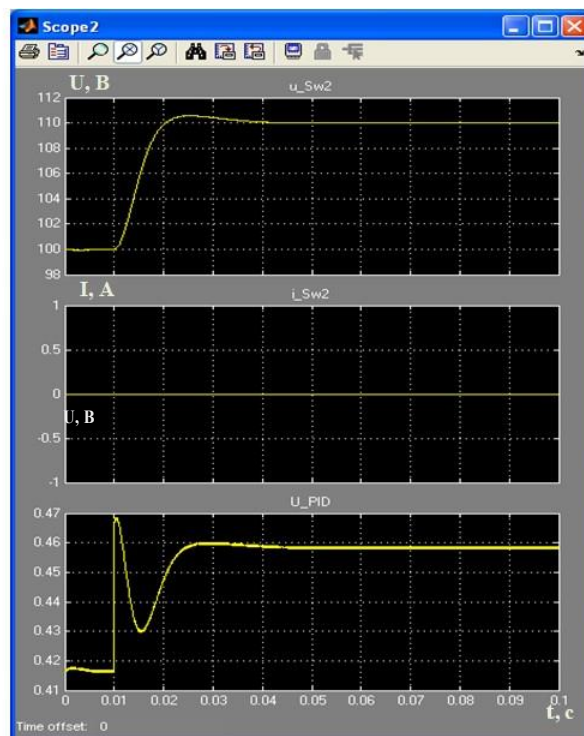


Рис. 29. Осциллограммы U_{Sw2} , i_{Sw2} и U_{PID} с ПИ-регулятором и обратной связи по току i_{C2} при отработке скачка задания 10 В
Fig. 29. Oscillograms of U_{Sw2} , i_{Sw2} and U_{PID} with PI-regulator and current feedback i_{C2} under step response of a 10V reference jump



Рис. 30. Осциллограммы i_{Sw1} , i_{D1} , i_L отработки возмущения в виде скачкообразного уменьшения R_n до 0,5 Ом
Fig. 30. Oscillograms of i_{Sw1} , i_{D1} , i_L of disturbance response in the form of a stepwise decrease of R_n to 0.5 Ohm

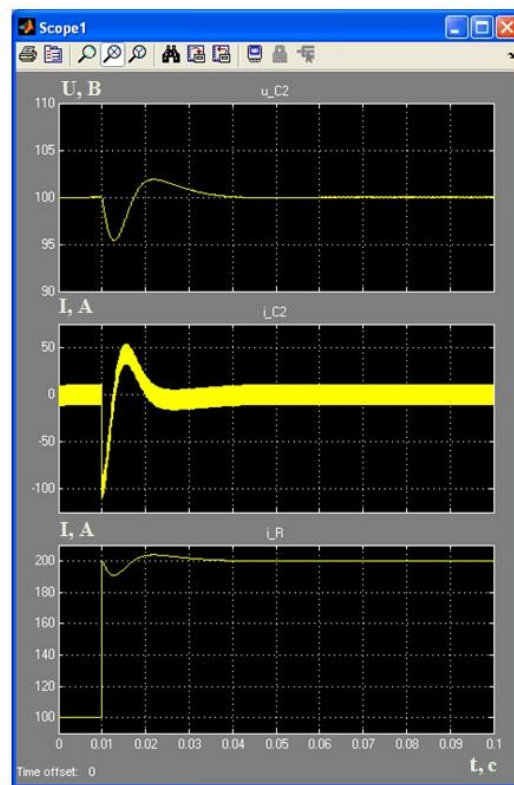


Рис. 31. Осциллограммы U_{C2} , i_{C2} и i_R отработки возмущения в виде скачкообразного уменьшения R_n до 0,5 Ом
Fig. 31. Oscillograms of U_{C2} , i_{C2} and i_R of disturbance response in the form of a stepwise decrease of R_n to 0.5 Ohm

Выводы

Предложена компьютерная модель согласующего DC/DC-преобразователя, построенная из элементов библиотеки *SimPowerSystems MATLAB/ Simulink*.

Выполнены исследования динамических свойств и сравнительный анализ способов управления DC/DC-преобразователем на компьютерной модели. Регулятор ПИ обратной связи по току

дает больше преимуществ по сравнению с другими вариантами.

За счет разработки согласующего преобразователя энергии и принципов его управления предложена возможность стабилизировать емкость корабельной аккумуляторной батареи, повысив возможность маневрирования кораблей, в том числе и для подводных аппаратов (батискафы, необитаемые глубоководные аппараты и т.д.).

Библиографический список

1. Карзов Б.Н., Кастров М.Ю., Жикленков Д.В. Понижающе-повышающий преобразователь с малыми перенапряжениями на полупроводниковых компонентах для ККМ с универсальным входом // Практическая силовая электроника. 2009. № 1(33), С. 6–12.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower Systems и Simulink. М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. 288 с.
3. Образцов А., Образцов С. Схемотехника DC/DC преобразователей // Современная электроника. 2005, № 3. С. 36–43.
4. Robin Vujanic. Design and Control of a Buck-Boost DC-DC Power Converter. Supervision: Dr. S. Mariethoz Prof. M. Morari. Semester Thesis July. 2008, 65 p.



References

1. Karzov B.N., Kastrov M.Ju., Zhiklenkov D.V. Buck-Boost converter with low overvoltages on semiconductor components for power factor correction (PFC) with universal input. *Prakticheskaja silovaja elektronika* [Practical power electronics], no. 1(33), 2009, pp. 6–12. (In Russian).
2. Chernyh I.V. *Modelirovanie jelectrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPower Systems i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPower

- Systems and Simulink]. Moscow: DMC Publ., Saint-Petersburg: Piter Publ., 2008, 288 p. (In Russian).
3. Obrazcov A., Obrazcov S. DC / DC converter circuitry. *Sovremennaja elektronika* [Modern electronics], 2005, no. 3, pp. 36–43. (In Russian).
4. Robin Vujanic. Design and Control of a Buck-Boost DC-DC Power Converter. Supervision: Dr. S. Mariethoz Prof. M. Morari. Semester Thesis July, 2008, 65 p.

Критерии авторства

Константинов Г.Г., Фам Конг Тао, Киселев В.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Konstantinov G.G, Pham Kong Tao, Kiselev V.I. 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.



Оригинальная статья / Original article
УДК 621.316.1.001.57
<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-123-130>

О КРИТЕРИЯХ ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

© Г.Г. Лачков¹

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Сформулировать критерии укрупненной технико-экономической оценки вариантов развития системообразующей электрической сети. **МЕТОД.** В основе подхода – технико-экономическая оценка вариантов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Сформулированы критерии укрупненной технико-экономической оценки вариантов развития системообразующей электрической сети, расчет которых осуществляется по блокам: капитальные вложения, годовые потери электроэнергии, ежегодные издержки, приведенные затраты, площадь отчуждаемой земли, расход алюминия на провода. Предусматривается расчет перечисленных показателей по варианту в целом и по отдельным составляющим сети: воздушные линии электропередачи переменного тока, электрические подстанции переменного тока, шунтирующие реакторы, источники реактивной мощности, воздушные линии электропередачи постоянного тока, преобразовательные подстанции. **ВЫВОДЫ.** Сформированная система критериев апробирована на практике и может быть использована для укрупненной технико-экономической оценки вариантов развития системообразующей электрической сети, определения системной эффективности новых типов электропередачи.

Ключевые слова: системообразующая электрическая сеть, вариант развития, технико-экономическая оценка, критерии.

Информация о статье. Дата поступления 13 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 07 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Лачков Г.Г. О критериях оценки вариантов развития системообразующей электрической сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 123–130. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-123-130

ON EVALUATION CRITERIA FOR BACKBONE ELECTRICAL NETWORK DEVELOPMENT VARIANTS

G.G. Lachkov

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is to formulate the criteria for a simplified technical and economic evaluation of backbone electrical network development variants. **METHOD.** The approach is based on the technical and economic evaluation of variants. **RESULTS.** The criteria for the simplified technical and economic evaluation of development variants for the backbone electrical network have been formulated. The variants have been calculated by blocks including capital investment, annual power losses, annual costs, discounted costs, areas of alienated land, aluminum consumption for wires. The calculation of the enumerated indices is envisaged for an option as a whole and for individual network components such as overhead AC transmission lines, electrical AC substations, shunt reactors, reactive power sources, overhead DC transmission lines, transformer substations. **CONCLUSIONS.** The elaborated system of criteria has been tested in practice and can be applied to perform a simplified technical and economic evaluation of backbone electrical network development variants and determine system efficiency of the new types of power transmission.

Keywords: backbone electrical network, development variant, technical and economic evaluation, criteria

Article info. Received December 13, 2017; accepted February 07, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Lachkov G.G. On evaluation criteria for backbone electrical network development variants. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 123–130. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-123-130

¹Лачков Георгий Георгиевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: g.lachkov@isem.irk.ru
Georgy G. Lachkov, Candidate of technical sciences, Senior Researcher, e-mail: g.lachkov@isem.irk.ru



Введение

Системообразующая электрическая сеть формирует Единую электроэнергетическую систему (ЕЭЭС) страны как целостный комплекс. Она включает в себя связи между объединенными электроэнергетическими системами (ОЭЭС), входящими в состав ЕЭЭС, и наиболее важные магистрали внутри отдельных ОЭЭС, нагрузка которых определяется режимом работы ЕЭЭС в целом. Основными функциями системообразующей электрической сети являются: выдача в систему мощности крупнейших электростанций, осуществление дальнего транспорта электроэнергии, обеспечение совместной синхронной работы электростанций и ОЭЭС с целью извлечения максимального системного эффекта от объединения на параллельную работу [1].

Системообразующая электрическая сеть характеризуется крупномасштабностью, пространственной протяженностью, структурной неоднородностью, технологической сложностью, большой капиталоемкостью. Для решения задач ее развития [2] применяются весьма сложные, в том числе оптимизационные математические модели и компьютерные программы с использованием различных критериев. В этом направ-

лении имеются существенные наработки как за рубежом [3–8 и др.], так и в России, в частности в ИСЭМ СО РАН [9–12 и др.]. Однако в отдельных случаях, например, при оценке системной эффективности новых типов электропередач [10–14], целесообразно осуществлять укрупненную технико-экономическую оценку вариантов развития системообразующей электрической сети.

Для решения подобных задач предназначена описываемая в статье система критериев, построенная по блочному принципу и включающая в себя блоки расчета: капитальные вложения; годовые потери электроэнергии; ежегодные издержки; приведенные затраты; площадь отчуждаемой земли; расход алюминия на провода. Система критериев предусматривает расчет перечисленных показателей по варианту в целом и по отдельным составляющим сети: воздушные линии электропередачи переменного тока; электрические подстанции переменного тока; шунтирующие реакторы; источники реактивной мощности; воздушные линии электропередачи постоянного тока; преобразовательные подстанции.

Блок «Капиталовложения»

Расчет капиталовложений для варианта развития электрической сети производится по вновь вводимым элементам сети на основе удельных (на единицу длины, мощности) капиталовложений и соответствующих данных о схеме сети по приведенным ниже аналитическим выражениям (1)–(7).

Капиталовложения в воздушные линии (ВЛ) переменного тока рассчитываются по данной формуле:

$$K_{\Sigma}^{\text{ВЛ}} = \sum_i K_i^{\text{ВЛ}} = \sum_i \gamma_{1i} \cdot l_i \cdot K_{od}^{\text{ВЛ}}, \quad (1)$$

где $K_i^{\text{ВЛ}}$ – капиталовложения в новые ВЛ i -й ветви схемы сети; $K_{od}^{\text{ВЛ}}$ – удельные (на единицу длины) капиталовложения в ВЛ типа

d ; l_i – длина i -й ветви; γ_{1i} – региональный коэффициент удорожания для ветви i , учитывающий природно-климатические и экономические условия региона.

Капиталовложения в шунтирующие реакторы (ШР) определяются согласно уравнению:

$$K_{\Sigma}^{\text{ШР}} = \sum_i K_i^{\text{ШР}} = \sum_i \gamma_{1i} \cdot \gamma_{2i} \cdot l_i \cdot Q_{od}^{\text{ЗАР}} \cdot K_{od}^{\text{ШР}}, \quad (2)$$

где $K_i^{\text{ШР}}$ – капиталовложения в новые ШР i -й ветви; $Q_{od}^{\text{ЗАР}}$ – удельная (на единицу длины) зарядная мощность ВЛ типа d ; γ_{2i} – коэффициент компенсации зарядной мощно-



сти ВЛ ветви i ; K_{od}^{III} – удельные (на единицу мощности) капиталовложения в ШР типа d .

Капиталовложения в подстанции (ПС) переменного тока рассчитываются как:

$$K_{\Sigma}^{PC} = \sum_j K_j^{PC} = \sum_j (K_{nj}^{TP} + K_{nj}^{ЯВ} + K_{nj}^{ПЧ}) = \sum_j \gamma_{1j} (n_{nmj}^{TP} \cdot K_{om}^{TP} + n_{nmj}^{ЯВ} \cdot K_{om}^{ЯВ} + n_{nmj}^{ПЧ} \cdot K_{om}^{ПЧ}), \quad (3)$$

где $K_{nj}^{TP}, K_{nj}^{ЯВ}, K_{nj}^{ПЧ}$ – капиталовложения во вновь вводимые трансформаторы, ячейки выключателей и постоянную часть подстанций j -го узла; $n_{nmj}^{TP}, n_{nmj}^{ЯВ}$ – количество новых трансформаторов и ячеек выключателей типа m , вводимых в j -м узле; $K_{om}^{TP}, K_{om}^{ЯВ}, K_{om}^{ПЧ}$ – удельные (на единицу мощности) стоимости трансформаторов, ячеек выключателей и постоянной части подстанций типа m ; S_{om}^{TP} – номинальная мощность трансформатора типа m ; γ_{1j} – районный коэффициент удорожания для узла j .

Капиталовложения в источники реактивной мощности (ИРМ) определяются следующим образом:

$$K_{\Sigma}^{ИРМ} = \sum_j K_j^{ИРМ} = \sum_j \gamma_{1j} \cdot Q_{nmj}^{ИРМ} \cdot K_{om}^{ИРМ}, \quad (4)$$

где $K_j^{ИРМ}$ – капиталовложения в новые ИРМ в j -м узле; $Q_{nmj}^{ИРМ}$ – мощность новых ИРМ ти-

па m в узле j ; $K_{om}^{ИРМ}$ – удельная (на единицу мощности) стоимость ИРМ типа m .

Капиталовложения в передачи постоянного тока (ППТ) определяются согласно выражению:

$$K_{\Sigma}^{ППТ} = \sum_i K_i^{ППТ} = \sum_i \gamma_{1i} \cdot l_i \cdot K_{od}^{ППТ}, \quad (5)$$

где $K_i^{ППТ}$ – капиталовложения в новые ВЛ постоянного тока в ветви i ; $K_{od}^{ППТ}$ – удельные капиталовложения в ВЛ постоянного тока типа d .

Капиталовложения в преобразовательные подстанции (ППС) рассчитываются по формуле:

$$K_{\Sigma}^{ППС} = \sum_j K_j^{ППС} = \sum_j \gamma_{1j} \cdot S_{nmj}^{ППС} \cdot K_{om}^{ППС}, \quad (6)$$

где $K_j^{ППС}$ – капиталовложения в новые преобразовательные подстанции в узле j ; $K_{om}^{ППС}$ – удельные капиталовложения в преобразовательные подстанции типа m ; $S_{nmj}^{ППС}$ – мощность новой преобразовательной подстанции типа m в узле j .

Общие по варианту развития сети капиталовложения определяются в виде суммы:

$$K_{\Sigma}^{BAP} = K_{\Sigma}^{BЛ} + K_{\Sigma}^{III} + K_{\Sigma}^{PC} + K_{\Sigma}^{ИРМ} + K_{\Sigma}^{ППТ} + K_{\Sigma}^{ППС}. \quad (7)$$

Блок «Потери электроэнергии»

Расчет потерь электроэнергии осуществляется как по вновь вводимым, так и по существующим элементам соответствующего варианта развития электрической сети, уравнения (8)–(12). При этом учитываются и переменные (нагрузочные), и постоянные (на корону, холостой ход) потери.

Потери электроэнергии в ВЛ переменного тока рассчитываются по формуле:

$$\Delta W_{\Sigma}^{BЛ} = \sum_i \left[\frac{(P_i^M)^2}{U_i^2} \cdot R_{od}^{BЛ} \cdot l_i \cdot T_i^M + \Delta W_{kdo}^{BЛ} \cdot l_i \right], \quad (8)$$

где P_i^M – максимальная передаваемая активная мощность по ветви i ; U_i – номинальное напряжение ВЛ i -й ветви; $R_{od}^{BЛ}$ – удельное активное сопротивление ВЛ типа d ; l_i – длина i -й ветви; T_i^M – годовое число часов максимальной нагрузки ВЛ ветви i ; $\Delta W_{kdo}^{BЛ}$ – удельные потери на корону ВЛ типа d .

Потери электроэнергии в ПС переменного тока рассчитываются следующим образом:

$$\Delta W_{\Sigma}^{PC} = \sum_j \left[\frac{P_{kmo}^{TP}}{n_{mj}^{TP}} \cdot T_j^M \cdot \left(\frac{P_j^M}{S_{mo}^{TP}} \right)^2 + 8760 \cdot P_{kmo}^{TP} \cdot n_{mj}^{TP} \right], \quad (9)$$



где P_{kmo}^{TP} – удельные потери холостого хода в трансформаторах типа m ; n_{mj}^{TP} – число трансформаторов типа m на j -й ПС; T_j^M – годовое число часов максимальной нагрузки j -й ПС; P_j^M – максимальная нагрузочная мощность j -й ПС; S_{mo}^{TP} – номинальная мощность трансформатора типа m .

Потери электроэнергии в ППТ определяются как:

$$\Delta W_{\Sigma}^{ППТ} = \sum_i \frac{(P_i^M)^2}{U_i^2} \cdot R_{do}^{ППТ} \cdot l_i \cdot T_i^M \cdot \gamma_{kd}^{ППТ}, \quad (10)$$

где $\Delta W_{\Sigma}^{ППТ}$ – суммарные годовые потери электроэнергии во всех ВЛ постоянного тока варианта схемы; P_i^M – максимальная передаваемая активная мощность по ветви i сети; U_i – номинальное межполюсное напряжение ВЛ постоянного тока i -й ветви; $R_{do}^{ППТ}$ – удельное активное сопротивление ВЛ постоянного тока типа d ; l_i – длина i -й ветви; T_i^M – годовое число часов макси-

мальной нагрузки ВЛ постоянного тока ветви i ; $\gamma_{kd}^{ППТ}$ – коэффициент потерь электроэнергии на корону в ВЛ постоянного тока типа d .

Потери электроэнергии в ППС рассчитываются согласно выражению:

$$\Delta W_{\Sigma}^{ППС} = \sum_j \Delta P_j^M \cdot T_j^M \cdot \beta_{nm}^{ППС}, \quad (11)$$

где ΔP_j^M – потери мощности в j -й ППС; T_j^M – годовое число часов максимальной нагрузки j -й ППС; P_j^M – максимальная нагрузка j -й ППС; $\beta_{nm}^{ППС}$ – коэффициент потерь электроэнергии в ППС типа m .

Общие по варианту развития сети потери электроэнергии определяются в виде суммы:

$$\Delta W_{\Sigma}^{BAP} = \Delta W_{\Sigma}^{ВЛ} + \Delta W_{\Sigma}^{ПС} + \Delta W_{\Sigma}^{ППТ} + \Delta W_{\Sigma}^{ППС}. \quad (12)$$

Блок «Ежегодные издержки»

Ежегодные издержки, включающие постоянную часть (издержки на амортизацию и обслуживание) и переменную часть (издержки на компенсацию потерь электроэнергии) рассчитываются как сумма по элементарным группам варианта сети, уравнения (13)–(19).

Издержки по ВЛ переменного тока рассчитываются по формуле:

$$И_{\Sigma}^{ВЛ} = \alpha_{и}^{ВЛ} \cdot K_{\Sigma}^{ВЛ} + C_{\Sigma} \cdot \Delta W_{\Sigma}^{ВЛ}, \quad (13)$$

где $K_{\Sigma}^{ВЛ}$ – суммарные капиталовложения в ВЛ переменного тока по варианту развития сети; $\Delta W_{\Sigma}^{ВЛ}$ – суммарные годовые потери электроэнергии в ВЛ переменного тока по варианту развития сети; $\alpha_{и}^{ВЛ}$ – коэффициент ежегодных издержек на амортизацию и обслуживание для ВЛ; C_{Σ} – стоимость потерь электроэнергии.

Издержки по ШР определяются как:

$$И_{\Sigma}^{ШР} = \alpha_{и}^{ПС} \cdot K_{\Sigma}^{ШР}, \quad (14)$$

где $\alpha_{и}^{ПС}$ – коэффициент ежегодных издержек на амортизацию и обслуживание для подстанционного оборудования; $K_{\Sigma}^{ШР}$ – суммарные капиталовложения во все ШР варианта сети.

Издержки по ПС переменного тока рассчитываются согласно выражению:

$$И_{\Sigma}^{ПС} = \alpha_{и}^{ПС} \cdot K_{\Sigma}^{ПС} + C_{\Sigma} \cdot \Delta W_{\Sigma}^{ПС}, \quad (15)$$

где $K_{\Sigma}^{ПС}$ – суммарные капиталовложения во вновь вводимые подстанции переменного тока по варианту сети; $\Delta W_{\Sigma}^{ПС}$ – суммарные потери электроэнергии по всем подстанциям переменного тока варианта сети.

Издержки по ИРМ определяются следующим образом:

$$И_{\Sigma}^{ИРМ} = \alpha_{и}^{ПС} \cdot K_{\Sigma}^{ИРМ}, \quad (16)$$

где $K_{\Sigma}^{ИРМ}$ – суммарные капиталовложения во все вновь вводимые ИРМ по варианту сети.



Издержки по ППТ рассчитываются как:

$$И_{\Sigma}^{ППТ} = \alpha_{и}^{ВЛ} \cdot K_{\Sigma}^{ППТ} + C_{\Sigma} \cdot \Delta W_{\Sigma}^{ППТ}, \quad (17)$$

где $K_{\Sigma}^{ППТ}$ – суммарные капиталовложения во все вновь вводимые ВЛ постоянного тока по варианту сети; $\Delta W_{\Sigma}^{ППТ}$ – суммарные потери электроэнергии по всем ВЛ постоянного тока варианта сети.

Издержки по ППС рассчитываются в соответствии с уравнением:

$$И_{\Sigma}^{ППС} = \alpha_{и}^{ПС} \cdot K_{\Sigma}^{ППС} + C_{\Sigma} \cdot \Delta W_{\Sigma}^{ППС}, \quad (18)$$

Блок «Приведенные затраты»

Приведенные (к первому году расчетного периода) затраты как и ежегодные издержки рассчитываются по элементным группам варианта сети, а затем суммируются (20)–(26).

Приведенные затраты по ВЛ переменного тока определяются как:

$$З_{\Sigma}^{ВЛ} = E_{н} \cdot K_{\Sigma}^{ВЛ} + И_{\Sigma}^{ВЛ}, \quad (20)$$

где $E_{н}$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Приведенные затраты по ШР рассчитываются согласно выражению:

$$З_{\Sigma}^{ШР} = E_{н} \cdot K_{\Sigma}^{ШР} + И_{\Sigma}^{ШР}. \quad (21)$$

Приведенные затраты по ПС переменного тока рассчитываются как:

$$З_{\Sigma}^{ПС} = E_{н} \cdot K_{\Sigma}^{ПС} + И_{\Sigma}^{ПС}. \quad (22)$$

где $K_{\Sigma}^{ППС}$ – суммарные капиталовложения во все вновь вводимые подстанции постоянного тока по варианту сети; $\Delta W_{\Sigma}^{ППС}$ – суммарные потери электроэнергии по всем подстанциям постоянного тока варианта сети.

Общие по варианту развития сети ежегодные издержки равны сумме издержек по элементным группам:

$$И_{\Sigma}^{ВАР} = И_{\Sigma}^{ВЛ} + И_{\Sigma}^{ШР} + И_{\Sigma}^{ПС} + И_{\Sigma}^{ИРМ} + И_{\Sigma}^{ППТ} + И_{\Sigma}^{ППС}. \quad (19)$$

Приведенные затраты по ИРМ определяются уравнением:

$$З_{\Sigma}^{ИРМ} = E_{н} \cdot K_{\Sigma}^{ИРМ} + И_{\Sigma}^{ИРМ}. \quad (23)$$

Приведенные затраты по ППТ рассчитываются как:

$$З_{\Sigma}^{ППТ} = E_{н} \cdot K_{\Sigma}^{ППТ} + И_{\Sigma}^{ППТ}. \quad (24)$$

Приведенные затраты по ППС рассчитываются следующим образом:

$$З_{\Sigma}^{ППС} = E_{н} \cdot K_{\Sigma}^{ППС} + И_{\Sigma}^{ППС}. \quad (25)$$

Общие по варианту развития сети приведенные затраты равны сумме приведенных затрат по элементным группам:

$$З_{\Sigma}^{ВАР} = З_{\Sigma}^{ВЛ} + З_{\Sigma}^{ШР} + З_{\Sigma}^{ПС} + З_{\Sigma}^{ИРМ} + З_{\Sigma}^{ППТ} + З_{\Sigma}^{ППС}. \quad (26)$$

Блок «Площадь отчуждаемой земли»

Площадь отчуждаемой под линии электропередачи и электрические подстанции земли подсчитывается по вновь вводимым линиям и подстанциям на основе удельной (на единицу длины или мощности) площади отчуждения, а затем суммируется в целом по варианту развития сети, формулы (27)–(31).

Площадь отчуждения под ВЛ переменного тока определяются как:

$$F_{\Sigma}^{ВЛ} = \sum_i n_{id}^{ВЛ} \cdot l_i \cdot F_{od}^{ВЛ}, \quad (27)$$



где $F_{od}^{ВЛ}$ – удельная площадь отчуждения ВЛ переменного тока типа d ; n_i – число новых цепей ВЛ в i -й ветви; l_i – длина i -й ветви.

Площадь отчуждения под ПС переменного тока рассчитываются следующим образом:

$$F_{\Sigma}^{GC} = \sum_i n_{jm}^{TP} \cdot S_{om}^{TP} \cdot F_{om}^{ПС}, \quad (28)$$

где $F_{om}^{ПС}$ – удельная площадь отчуждения ПС переменного тока типа m ; n_{jm}^{TP} – число новых трансформаторов типа m в j -м узле; S_{om}^{TP} – номинальная мощность трансформатора типа m .

Площадь отчуждения под ВЛ постоянного тока определяется выражением:

$$F_{\Sigma}^{ППТ} = \sum_i n_{id}^{ППТ} \cdot l_i \cdot F_{od}^{ППТ}, \quad (29)$$

где $F_{od}^{ППТ}$ – удельная площадь отчуждения ВЛ постоянного тока типа d ; $n_{id}^{ППТ}$ – число новых цепей ВЛ постоянного тока типа d в i -й ветви; l_i – длина i -й ветви.

Площадь отчуждения под преобразовательные подстанции рассчитывается по формуле:

$$F_{\Sigma}^{ППС} = \sum_j F_{om}^{ППС} \cdot S_{mj}^{ППС}, \quad (30)$$

где $F_{om}^{ППС}$ – удельная площадь отчуждения преобразовательных подстанций типа m ; $S_{mj}^{ППС}$ – мощность новой преобразовательной подстанции в узле j .

Общая по варианту развития сети площадь отчуждения равна сумме:

$$F_{\Sigma}^{BAP} = F_{\Sigma}^{ВЛ} + F_{\Sigma}^{ПС} + F_{\Sigma}^{ППТ} + F_{\Sigma}^{ППС}. \quad (31)$$

Блок «Расход алюминия на провода»

Расчет расходуемого на провода алюминия по варианту развития сети осуществляется по вновь вводимым линиям электропередачи на основе удельных (на единицу длины) расходов алюминия для каждого типа электропередачи.

Расход алюминия на провода воздушных линий электропередачи переменного тока рассчитываются следующим образом:

$$G_{\Sigma}^{ВЛ} = \sum_i n_{id}^{ВЛ} \cdot l_i \cdot G_{od}^{ВЛ}, \quad (32)$$

где $G_{od}^{ВЛ}$ – удельный расход алюминия на провода для ВЛ переменного тока типа d ; $n_{id}^{ВЛ}$ – число цепей ВЛ переменного тока типа d в i -й ветви; l_i – длина i -й ветви.

Расход алюминия на провода воздушных линий электропередачи постоян-

ного тока рассчитываются следующим образом:

$$G_{\Sigma}^{ППТ} = \sum_i n_{id}^{ППТ} \cdot l_i \cdot G_{od}^{ППТ}, \quad (33)$$

где $G_{od}^{ППТ}$ – удельный расход алюминия на провода для ВЛ постоянного тока типа d ; $n_{id}^{ППТ}$ – число цепей ВЛ постоянного тока типа d в i -й ветви; l_i – длина i -й ветви.

Общий по варианту развития сети расход алюминия на провода равен сумме:

$$G_{\Sigma}^{BAP} = G_{\Sigma}^{ВЛ} + G_{\Sigma}^{ППТ}. \quad (34)$$

Сравнение вариантов осуществляется по основному критерию – минимому приведенных затрат (36), а также по дополнительным критериям – минимуму площади отчуждаемой земли (31) и минимуму расхода алюминия на провода (34).

Заключение

Описанные критерии прошли практическую апробацию. С их применением по заказу института «Энергосетьпроект» про-

водились расчетные исследования перспективного развития системообразующей электрической сети ЕЭЭС России, резуль-



таты которых вошли в одну из Схем развития ЕЭЭС страны.

С применением изложенных критериев можно осуществлять укрупненное технико-экономическое сравнение вариан-

тов развития системообразующей электрической сети на отдаленную перспективу, определять системную эффективность новых типов электропередачи.

Библиографический список

1. Волькенау И.М., Зейлигер А.Н., Хабачев Л.Д. Экономика формирования электроэнергетических систем. М.: Энергия, 1981. 320 с.
2. Лачков Г.Г., Ханаев В.А. Основные задачи перспективного развития системообразующей сети ЕЭЭС // Управляемые электропередачи. 1989, Вып. 2. С. 14–28.
3. Дале В.А., Кришан З.П., Паэгле О.Г. Динамическая оптимизация развития электрических сетей. Рига: Зинатне, 1990. 248 с.
4. Da Silva E.L., Gil H.A., Areiza J.M. Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm // IEEE Trans. on Power Systems. 2000. Vol. 15. No. 3. P. 501–511.
5. H. Sun, D. C. Yu. A multiple-objective optimization model of transmission enhancement planning for independent transmission company, in Proc. Power Engineering Society Summer Meeting. 2000. Vol. 4. P. 2033–2038.
6. M. Oloomi Buygi, H. Modir Shanechi, and M. Shahidehpour. Transmission planning in deregulated environment, International Journal of Engineering, Oct. 2002. Vol. 15. No. 3. P. 249–256.
7. H. Shariati, H. Askarian Abyaneh. Transmission expansion planning considering security costs under market environment,” in Proc. 2008 IEEE International Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. P. 1430–1435.
8. Yoon J.-Y., Kim H.-Y., Park D.-W. Pre-feasibility study results on NEAREST between the ROK, the DPRK and the RF// Proceedings of the 6th International Conference “Asian Energy Cooperation: Forecasts and Realities”. Irkutsk, Energy Systems Institute. 2008, P. 59–67.
9. Беляев Л.С., Ким Х.-Ё., Лю Т.-Х., Подковальников С.В., Юн Дж.-Ё. Комплексная оценка эффективности межгосударственных электрических связей в Северо-Восточной Азии // Электронный сборник докладов объединенного симпозиума «Энергетика России в 21 веке и Азиатская энергетическая кооперация», Иркутск, ИСЭМ СО РАН. 2010. 10 с.
10. Усов И.Ю., Попова О.М. Формирование базы данных для оптимизации структуры системообразующей электрической сети // Вестник ИргТУ, 2013. № 1. С. 139–144.
11. Драчев П.С. Рыночная модель развития основной электрической сети // Вестник ИргТУ, 2013. № 1. С. 125–133.
12. Воропай Н.И., Подковальников С.В., Труфанов В.В. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование. Новосибирск: Наука, 2015. 448 с.
13. Ханаев В.А., Лачков Г.Г., Воропай Н.И. и др. Системная эффективность электропередач повышенной натуральной мощности в ЕЭЭС в отдаленной перспективе // Управляемые электропередачи. 1989. Вып. 2. С. 3–12.
14. Воропай Н.И., Лачков Г.Г., Поречный О.Н. Системная эффективность и возможные масштабы применения новых средств передачи электроэнергии в ЕЭЭС в долгосрочной перспективе. В кн.: Системы энергетики: управление развитием и функционированием. Новосибирск: Наука, 1985. С. 72–73.

References

1. Vol'kenau I.M., Zejliger A.N., Habachev L.D. Jekonomika formirovaniya jelek-troenergeticheskikh sistem [Economy of electric power system formation]. Moscow: Jenergija Publ., 1981, 320 p. (In Russian).
2. Lachkov G.G., Hanaev V.A. The main tasks of the long-term development of the system-forming network of the unified power grid. *Upravljaemye jelektrperedachi* [Controlled Power Transmission], 1989, issue 2, pp. 14–28.
3. Dale V.A., Krishan Z.P., Pajegle O.G. Dinamicheskaja optimizacija razvitija jelektricheskikh setej [Dynamic optimization of electrical network development]. Riga: Zinatne Publ., 1990, 248 p.
4. Da Silva E.L., Gil H.A., Areiza J.M. Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, vol. 15. no. 3, pp. 501–511.
5. H. Sun, D. C. Yu. A multiple-objective optimization model of transmission enhancement planning for independent transmission company, in Proc. Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, vol. 4, pp. 2033–2038.
6. M. Oloomi Buygi, H. Modir Shanechi, and M. Shahidehpour. Transmission planning in deregulated environment, International Journal of Engineering, Oct. 2002, vol. 15, no. 3, pp. 249–256.
7. H. Shariati, H. Askarian Abyaneh. Transmission expansion planning considering security costs under market environment,” in Proc. 2008 IEEE International Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 1430–1435.



8. Yoon J.-Y., Kim H.-Y., Park D.-W. Pre-feasibility study results on NEAREST between the ROK, the DPRK and the RF// Proceedings of the 6th International Conference "Asian Energy Cooperation: Forecasts and Realities". Irkutsk, Energy Systems Institute. 2008, pp. 59–67.
9. Beljaev L.S., Kim H.-Jo., Lju T.-H., Podkoval'nikov S.V., Jun Dzh.-Jo. Kompleksnaja ocenka jeffektivnosti mezhgosudarstvennyh jelektricheskikh svjazej v Severo-Vostochnoj Azii [Comprehensive assessment of inter-state electric connection efficiency in Northeast Asia] // Jelektronnyj sbornik dokladov ob'edinennogo simpoziuma «Jenergetika Rossii v 21 veke i Aziatskaja jenergeticheskaja kooperacija» [Electronic Collected Papers of the Joint Symposium "Russian Power Sector in the 21st Century and the Asian Energy Cooperation"], Irkutsk, MESI SB RAS. 2010, 10 p.
10. Usov I.Ju., Popova O.M. Database formation to optimize backbone electric network structure. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 1, pp. 139–144. (In Russian).
11. Drachev P.S. Market-based transmission system development model. *Vestnik Irkutskogo gosudarstven-*

- nogo tehničeskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 1, pp. 125–133. (In Russian).
12. Voropaj N.I., Podkoval'nikov S.V., Trufanov V.V. *Obosnovanie razvitija jelektrojenergetičeskikh sistem: Metodologija, modeli, metody, ih ispol'zovanie* [Substantiation of electric power system development: Methodology, models, methods and their use]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2015, 448 p. (In Russian).
13. Hanaev V.A., Lachkov G.G., Voropaj N.I. System efficiency of increased natural power electrical transmission in the unified power grid in remote perspective. *Upravljaemye jelektroperedachi* [Controlled Power Transmission]. 1989, issue 2, pp. 3–12. (In Russian).
14. Voropaj N.I., Lachkov G.G., Porechnyj O.N. Sistemnaja jeffektivnost' i voz-mozhnye masshtaby primenenija novyh sredstv peredachi jelektrojenergii v EJe-JeS v dolgosročnoj perspective [Systemic efficiency and possible scale of new power transmission facilities application in the power grid in the long term.]. *Sistemy jenergetiki: upravlenie razvitiem i funkcionirovaniem* [Energy Systems: Development and Operation Management]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985, pp. 72–73. (In Russian).

Критерии авторства

Лачков Г.Г. полностью подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Lachkov G.G. has prepared the manuscript 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.



ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

© Р.В. Солопов¹, А.С. Самульченков²

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Российская Федерация, 214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, д. 1.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Разработка метода расчета установившихся режимов электрической сети (УР ЭС) с использованием генетического алгоритма (ГА). **МЕТОДЫ.** Предложен метод расчета УР ЭС с использованием генетических алгоритмов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Показана принципиальная возможность применения ГА для расчета УР ЭС. Составлен алгоритм и программа для расчета УР ЭС методом ГА. Проведена верификация результатов расчетов методом ГА с результатами расчета традиционными итерационными методами математического анализа. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработан альтернативный метод расчета УР ЭС, достоинством которого является высокая точность расчетов при значительном снижении требований к вычислительным ресурсам.

Ключевые слова: расчет режима сети, генетический алгоритм, установившийся режим, методы расчета установившегося режима, электрические сети.

Информация о статье. Дата поступления 27 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 07 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Солопов Р.В., Самульченков А.С. Применение генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 131–141. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-131-141

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM FOR ELECTRIC CIRCUIT STEADY-STATE RESPONSE CALCULATION

R.V. Solopov, A.S. Samulchenkov

Smolensk branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute",

1, Energeticheskii Proezd, Smolensk, 214013, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is to develop a method of electric circuit steady state response calculation (ECSSR) using a genetic algorithm (GA). **METHODS.** A method is proposed for ECSSR calculation using genetic algorithms. **RESULTS.** We have shown the possibility in principle to use a genetic algorithm for ECSSR calculation. An algorithm and a program for ECSSR calculation by the genetic algorithm method have been developed. The calculation results obtained through the use of the genetic algorithm method have been verified by the calculation results received with the use of traditional iterative methods of mathematical analysis. **CONCLUSION.** An alternative method of ECSSR calculation has been developed. Its advantage is high calculation accuracy under significantly reduced requirements for computing resources.

Keywords: computing response of a circuit, genetic algorithm, steady state, methods of computing steady state response, electric circuits

Article info. Received December 27, 2017; accepted February 07, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Solopov R.V., Samulchenkov A.S. Application of genetic algorithm for electric circuit steady-state response calculation. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 131–141. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-131-141

Введение

Расчет установившегося режима электрической сети является актуальной задачей в электроэнергетике как на этапе

проектирования, так и в процессе эксплуатации. Точность и достоверность расчетов обеспечивают правильное функционирование

¹Солопов Роман Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, e-mail: solopov.rv@mail.ru

Roman V. Solopov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Power Systems, e-mail: solopov.rv@mail.ru

²Самульченков Антон Сергеевич, студент, e-mail: samulchenkov@yandex.ru

Anton S. Samulchenkov, Student, e-mail: samulchenkov@yandex.ru



ние элементов электрической сети и энергосистемы в целом.

Расчет установившихся режимов представляет собой определение всех параметров установившегося режима при известных параметрах системы (схемы соединения элементов, сопротивления линий, трансформаторов и т.д.) и режимных параметрах [1]. Расчет УР ЭС в реальных условиях только с использованием электроэнергетических законов (Закон Ома, Законы Кирхгофа для токов и напряжений и закон Джоуля-Ленца для мощностей) невозможен. В связи с этим расчет установившихся режимов сложных электрических систем связан с большими математическими и вычислительными трудностями. Именно по этой причине поиск наиболее оптимальных методов расчета установившихся режимов является важной задачей [1–5].

При расчете установившегося режима решается задача построения соот-

ветствующей математической модели, описывающей все физические процессы [1, 3, 6, 7], происходящие в электрической сети с заданными допущениями, которая представляется системой нелинейных алгебраических уравнений. Модели реальных электрических систем описываются системой нелинейных алгебраических уравнений высокого порядка, что вызывает определенные трудности, связанные с точностью расчета электронно-вычислительных машин ЭВМ.

На следующем этапе ставится задача выбора метода решения полученной системы нелинейных алгебраических уравнений. Наиболее распространенными являются итерационные методы расчета [1, 3, 6, 7]. В последнее время стали применяться методы расчета, основанные на идеях искусственного интеллекта (нейронные сети) [8, 9].

Применение итерационных методов и нейронных сетей для расчета УР ЭС

Итерационные методы (или методы последовательных приближений) [1, 6, 7] являются общепризнанными, они нашли широкое практическое применение при расчете установившихся режимов электрической сети. К итерационным методам относятся: метод простой итерации, метод Зейделя, метод Ньютона и его модификации, градиентный метод и др. [6, 7].

Для решения нелинейных систем уравнений вычислительной способности методов простой итерации и Зейделя не всегда достаточно, поэтому на практике эти методы применяются редко и используются для расчета режима простых электрических сетей.

С теоретической точки зрения метод Ньютона является наиболее привлекательным, но его практическое применение наталкивается на определенные трудности:

- вычисление на каждой итерации матрицы $F'(x^k)$ из m^2 частных производных, где m – порядок системы;

- решение системы линейных уравнений на каждом шагу;

- вычисление обратной матрицы Якоби $F'(x^k)^{-1}$ при отказе от линеаризации системы на каждом шагу;

- проблема нахождения хорошего начального приближения. Зачастую приходится использовать градиентные методы для определения удовлетворительного приближения к решению, а уже после вести расчет методом Ньютона;

- функции, входящие в систему, должны быть дважды непрерывно дифференцируемы и ранг матрицы Якоби должен быть равен ее размеру [6, 7].

При всех вышеперечисленных недостатках метод Ньютона до сих пор остается основным для расчета установившихся режимов электрической сети ввиду высокой скорости сходимости (при хороших начальных приближениях достаточно произвести 3–5 итераций) и благодаря вычислительным возможностям современных ЭВМ.



Как было отмечено ранее, реальные электрические сети имеют сложную нелинейную структуру, анализ и моделирование которых традиционными (итерационными) методами требуют больших ресурсов ЭВМ. Вместе с тем использование итерационных методов для оперативных расчетов также малоэффективно ввиду больших временных затрат, связанных с вычислительной громоздкостью данных методов [9]. Именно эти обстоятельства вызывают необходимость внедрения новых современных способов расчета установившихся режимов электрических сетей. С этой точки зрения перспективным является направление, связанное с применением методов искусственного интеллекта, в частности, искусственных нейронных сетей (ИНС), которые получили достаточно широкое распространение в промышленно развитых странах [8].

Принцип действия ИНС основан на аппроксимации входных данных посредством уже имеющихся данных (обучающей выборки) различных режимов работы электроэнергетической системы (ЭЭС). Модель ЭЭС реализуется на базе многослойной нейронной сети, которая связывает искомые параметры с заданными посредством явной функциональной зависимости. Это позволяет отказаться от итерационных схем расчета, хотя требует обязательного предварительного обучения ИНС [9].

Достоинства нейронных сетей:

- хорошо обученная нейросеть обладает способностью не только правильно реагировать на входные данные, предъявленные в процессе обучения, но и справ-

ляться с любыми другими наборами данных из допустимого пространства входных сигналов [8];

- для расчета установившегося режима уже обученной ИНС требуются незначительные вычислительные и временные ресурсы;

- сравнительно маленькая погрешность расчета при удачно обученной и правильно сформированной ИНС для конкретной ЭЭС.

Недостатки нейронных сетей:

- обучение нейронных сетей нужно производить с помощью численных экспериментов с математической моделью или с помощью имеющихся реальных параметров установившегося режима функционирующей электрической сети;

- размер обучающей выборки велик – от нескольких 100 до нескольких 1000 различных режимов, учитывающих характерные особенности только рассматриваемой ЭЭС;

- отсутствие возможности универсализации метода расчета установившихся режимов ЭЭС посредством ИНС.

В настоящее время неразрешенность проблем обучения и оптимального выбора структуры искусственной нейронной сети является наиболее существенным фактором, предопределяющим отсутствие возможности применения данного метода для расчета реальных электрических сетей.

В данной работе предложена новая методика расчета установившегося режима электрической сети с применением генетического алгоритма (ГА).

Применение генетического алгоритма для расчета УР ЭС

Генетические алгоритмы наряду с ИНС являются новой и малоизученной областью исследований, основные понятия и принципы работы которых заимствуются из биологической теории естественного отбора и теории эволюции.

Генетические алгоритмы (ГА) – это адаптивные методы поиска, в которых используется аналог механизма генетическо-

го наследования и аналог естественного отбора при сохранении биологической терминологии в упрощенном виде [10, 11, 12]. ГА получили широкое распространение применительно к решению оптимизационных задач [5, 11, 13] ввиду того, что основная идея поиска решений с помощью ГА – это определение наиболее приспособленной особи среди множества особей от-



дельно взятого поколения путем поэтапно-видоизменения начального поколения, подчиняющегося основным принципам теории естественного отбора. Основными понятиями ГА являются:

- Аутбридинг – способ создания родительской пары, при котором она формируется из максимально различающихся индивидуумов.
- Ген – параметр рассматриваемого объекта.
- Естественный отбор – операция отбора наиболее приспособленных индивидуумов для создания популяции нового поколения.
- Инбридинг – способ создания родительской пары, при котором она формируется из максимально близких индивидуумов.
- Кодирование – процедура представления вектора значений параметров рассматриваемой системы в виде хромосом.
- Кроссовер (кроссинговер, рекомбинация) – один из основных генетических операторов, при котором два индивидуума обмениваются своими частями.
- Мутация – один из основных генетических операторов, при котором происходит случайное изменение одного или нескольких генов.
- Панмиксия – способ выбора родительской пары, при котором индивидуумы выбираются случайным образом.
- Поколение – один цикл эволюционной популяции.
- Популяция – совокупность индивидуумов.
- Функция приспособленности – значение целевой функции, вычисляемое для каждой особи и характеризующее шансы на дальнейшее выживание в условиях естественного отбора.
- Хромосома – последовательность генов, характеризующая особь (индивидуума).

ГА использует принципы взаимодействия совокупности искомых решений, представленных в виде хромосом аналогично принципам взаимодействия индиви-

дуумов в природе, поэтому, предварительно корректно сформулировав условие поставленной задачи (расчет установившегося режима электрической сети) с помощью ГА, можно отыскать решение, соответствующее не только нормальному режиму работы, но и являющееся оптимальным ввиду специфики применяемой методики. Для ГА, в отличие от традиционных методов решения, не важен вид рассматриваемой функции, так как ГА работает не с самой функцией, а с ее значениями в определенных точках. По этой причине для решения технических задач, требующих больших вычислительных ресурсов, ГА предпочтительнее традиционных методов расчета ввиду отсутствия накладываемых ограничений на рассматриваемую функцию и выполнения трудоемких пошаговых алгебраических операций, таких как вычисление производных.

При решении практических задач с использованием ГА обычно выполняют следующие этапы [12, 14, 15]:

- выбор способа представления решения – вид решения задачи напрямую зависит от представления начальных данных, которые для решения ряда задач иногда приходится кодировать (бинарный код, код Грея и др.);
- разработка операторов случайных изменений – выбирают один из способов формирования родительских пар исходя из характеристик параметров решаемой задачи, после производится выбор операторов воспроизведения и мутации, они предварительно видоизменены таким образом, чтобы наиболее удачно функционировали в совокупности применительно к решению конкретной задачи;
- определение способов «выживания» решений – разработка наиболее соответствующего оптимальному в рамках рассматриваемой задачи метода отбора (селекции) и условий «выживания» для особей с наилучшими или наихудшими показателями функции приспособленности;
- создание начальной популяции решений – случайная генерация заданного количества хромосом популяции начально-



го поколения, гены которых являются численными эквивалентами случайных решений, значения которых соблюдены в рамках допустимых ограничений.

По своей сути ГА схож с итерационными методами – это случайным образом сгенерированная начальная популяция, состоящая из определенного количества хромосом (совокупности решений) с помощью последовательного применения определенной совокупности операторов селекции, воспроизведения потомства, мутации, после каждого из которых образуется промежуточная популяция, видоизменяется и уже следующее поколение имеет лучшие показатели приспособленности в сравнении с предыдущим, по разнице между которыми можно оценивать рентабельность применения ранее составленного алгоритма применительно к конкретной задаче. Но существенным и выгодным отличием ГА от

традиционных методов является лояльность к математической строгости рассматриваемых функций, описывающих математическую модель рассматриваемой задачи. В связи с этим для расчета одного поколения ГА, эквивалентного одной итерации выполняемой традиционными методами расчета, требуется значительно меньше вычислительных затрат, что значительно экономит временные ресурсы и ресурсы ЭВМ. Недостатком ГА, по сравнению с традиционными методами, является отсутствие универсальности решения для широкого круга задач, обусловленное индивидуальностью составленного алгоритма применительно к решению однородных задач.

На основании метода ГА разработан алгоритм расчета установившегося режима электрической сети (рис. 1) с учетом характерных особенностей рассматриваемого круга задач.

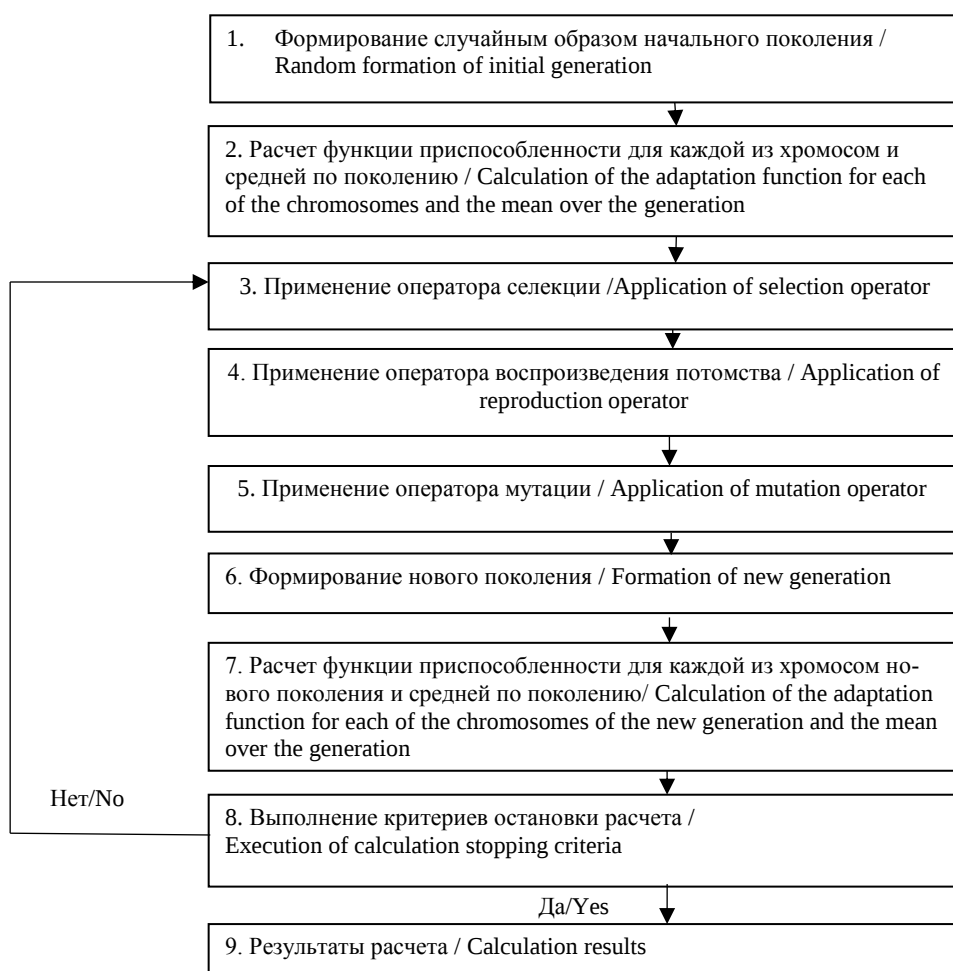


Рис. 1. Алгоритм расчета УР ЭС методом ГА

Fig. 1. Algorithm for ECSSR calculation using the genetic algorithm method



Формирование начальной совокупности производится случайным образом по номинальным данным сети из допустимого диапазона значений. Функция приспособленности составляется на основании баланса мощности, записанного в виде уравнения узловых потенциалов в матричной форме [5]. Критерии мутации рассчитываются на основании исходных данных для электрической сети по специально разработанным алгоритмам. Формирование нового поколения производится на основании применения оператора селекции «турнирный отбор». Расчет ведется до выполнения

критериев остановки, значения которых задаются пользователем.

Законы электротехники накладывающие определенные ограничения на полученные результаты, что является отличительной особенностью применения ГА в области электроэнергетики.

На основании данного алгоритма разработана программа расчета УР ЭС. Скриншот программы представлен на рис. 2.

Для примера рассмотрен расчет установившегося режима 6-узловой схемы электрической сети [8], представленной на рис. 3.

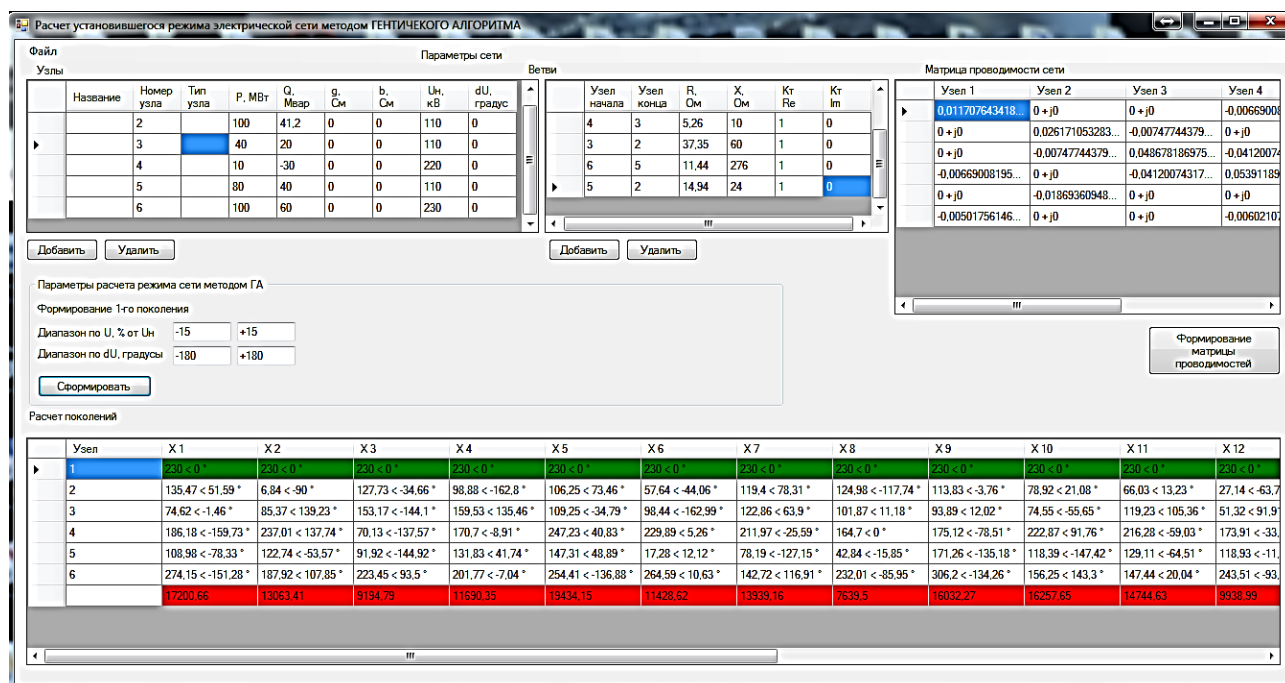


Рис. 2. Программа расчета УР ЭС методом ГА
Fig. 2. Program for ECSSR calculation using the genetic algorithm method

Результаты расчета УР ЭС

Расчет производился с применением разработанного метода ГА для рассматриваемой электрической сети. В качестве сравнения использовались данные, полученные с помощью программы RastrWin3, принцип работы которой основан на расчете итерационными методами (табл. 1–3).

По методике оценки скорости алгоритмов изложенной в [16] асимптотическая сложность расчета генетическим алгоритмом по времени выполнения меньше в 10–70 раз по сравнению с итерационными методами [6, 7] при стремлении размера входных данных к бесконечности.

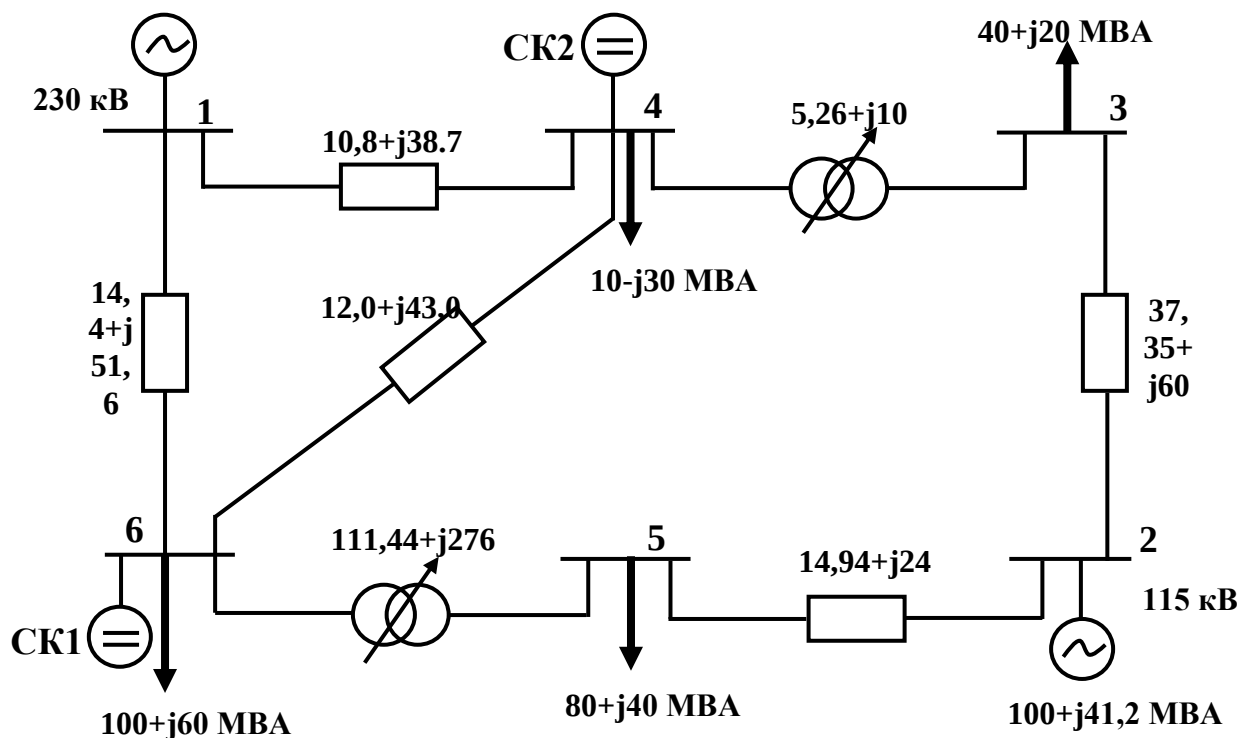


Рис. 3. Схема электрической сети
Fig. 3. Electrical network schematic diagram

Таблица 1

Результаты расчета зависимых переменных установившегося режима
применительно к рассматриваемой 6-узловой схеме электрической сети

Table 1

Calculation results of steady-state mode dependent variables as applied to the 6-node
power circuit diagram under consideration

№ узла / Node no.	Генетический алгоритм / Genetic algorithm		RastrWin3 / RastrWin3		Расхождение / Discrepancy	
	Модуль напряжения, кВ / Voltage module, kV	Фаза, градусы / Phase, degrees	Модуль напряжения, кВ / Voltage module, kV	Фаза, градусы / Phase, degrees	Модуль напряжения, кВ / Voltage module, kV	Фаза, градусы / Phase, degrees
1	230	0	230	0	0	0
2	115,00	1,53	114,98	1,57	-0,02	0,04
3	110,27	-2,70	110,25	-2,75	-0,02	-0,05
4	222,11	-2,55	222,06	-2,59	-0,05	-0,04
5	96,20	-5,67	96,18	-5,72	-0,02	-0,05
6	213,89	-3,78	213,80	-3,74	-0,09	0,04



Таблица 2

Результаты расчета параметров установившегося режима применительно
к рассматриваемой 6-узловой схеме электрической сети

Table 2

Calculation results of steady-state mode parameters as applied to the 6-node power circuit
diagram under consideration

№ Линии / Line no.	Генетический алгоритм/ Genetic algorithm		RastrWin3 / RastrWin3		Расхождение / Discrepancy	
	Активная мощность, МВт / Active power, MW	Реактивная мощность, МВАр / Reactive power, MVAr	Активная мощность, МВт / Reactive power, MVAr	Реактивная мощность, МВАр / Reactive power, MVAr	Активная мощность, МВт / Active power, MW	Реактивная мощность, МВАр / Reactive power, MVAr
1-4	-66,965	-29,511	-67,895	-29,589	-0,927	-0,078
4-1	65,872	25,593	66,775	25,577	0,903	-0,016
1-6	-77,440	-52,271	-76,892	-52,781	0,548	-0,51
6-1	75,064	43,756	74,524	44,296	-0,54	0,54
6-4	32,523	31,557	31,134	32,159	-1,389	0,602
4-6	-33,061	-33,487	-31,660	-34,043	1,401	-0,556
6-5	-5,602	-16,503	-5,830	-16,456	-0,228	0,047
5-6	1,381	3,668	1,439	3,654	0,058	-0,014
5-2	73,816	25,771	74,270	25,383	0,454	-0,388
2-5	-83,685	-41,624	-84,220	-41,366	-0,535	0,528
2-3	-15,561	0,045	-15,806	0,175	-0,245	0,130
3-2	14,877	-1,144	15,100	-1,309	0,223	-0,165
4-3	-24,419	-22,044	-24,991	-21,515	-0,572	0,529
3-4	6,076	5,456	6,219	5,324	0,143	-0,132



Таблица 3

Результаты расчета потерь и потребляемой мощности установившегося режима применительно к рассматриваемой 6-узловой схеме электрической сети

Table 3

Calculation results of losses and consumed power of the steady-state mode as applied to the 6-node power circuit diagram under consideration

Генетический алгоритм / Genetic algorithm		RastrWin3 / RastrWin3		Расхождение / Discrepancy	
Активная мощность, МВт / Active power, MW	Реактивная мощность, МВАр / Reactive power, MVar	Активная мощность, МВт / Active power, MW	Реактивная мощность, МВАр / Reactive power, MVar	Активная мощность, МВт / Active power, MW	Реактивная мощность, МВАр / Reactive power, MVar
Потери мощности в электрической сети / Power losses in electrical network					
14,752	33,366	14,861	33,559	0,107	0,193
Потребляемая мощность электрической сети / Power consumption					
144,752	82,166	144,861	82,359	0,107	0,193

Выводы

Применение генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети является достойной альтернативой как традиционным методам расчета, так и ИНС.

В отличие от итерационных методов правильная конфигурация основных операторов ГА позволяет избежать большого количества трудоемких алгебраических операций и не накладывает никаких ограничений на рассматриваемую систему нелинейных уравнений. Поэтому вычислительные и временные ресурсы, связанные с реализацией расчета посредством ГА меньше ресурсов, затраченных на расчет с помощью традиционных методов.

Основными недостатками ИНС в сравнении с ГА являются отсутствие возможности универсализации методов расчета и определенные сложности обучения нейронной сети, связанные в первую очередь с тем, что еще до расчета установившегося режима электрической сети (РУРЭС) с помощью ИНС нужно знать парамет-

ры большого количества режимов работы рассматриваемой электрической сети. Следовательно, для оперативных расчетов функционирующей электрической сети обучающую выборку для ИНС можно формировать с помощью показаний приборов, а на этапах проектирования электрической сети обучающая выборка будет состоять из результатов, полученных на основании расчетов режимов итерационными методами, что является бессмысленным при учете среднего количества режимов, требующихся для обучения ИНС.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности разработки и внедрения универсальных алгоритмов расчета на основе ГА применительно к РУРЭС. Погрешность расчета, небольшая в сравнении с общепризнанными итерационными методами, является следствием плохой обусловленности рассматриваемой системы нелинейных уравнений, описывающих работу ЭЭС.



Библиографический список

1. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М., Неуймин В.Г. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах. М.: Изд-во Флинта, 2008. 256 с.
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
3. Кавченков В.П., Солопов Р.В. Алгоритм комплексной оптимизации режимов электроэнергетической системы с использованием обобщенных критериев подобия // Программные продукты и системы. 2013. № 1. 23 с.
4. Solopov R., Kavchenkov V., Doletskaya L., Kiselev V. Effective solution of large-scale optimization problems using the similarity criteria // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. No. 12. P. 3539–3541.
5. Solopov R.V. Criterion complex optimization in electric-power systems // Russian Electrical Engineering. 2017. No. 5. P. 280–284.
6. Ортега Д., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. М.: Изд-во Мир, 1975. 560 с.
7. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров. М.: Высшая школа, 1994. 544 с.
8. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. О применении нейронных сетей при расчетах установившихся режимов электрических сетей // Проблемы энергетики. 2009. № 1 с. 21 – 31
9. Хохлов М.В. Расчеты установившихся режимов ЭЭС с использованием нейронных сетей. В кн.: Новые информационные технологии в задачах оперативного управления электроэнергетическими системами. Екатеринбург: Уральское отделение Российской академии наук (УРО РАН), 2002. С. 102–126.
10. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. 87 с.
11. Yuancheng Li, Yiliang Wang and Bin Li. A hybrid artificial bee colony assisted differential evolution algorithm for optimal reactive power flow // Electrical Power and Energy Systems. 2013. No. 52. P. 25–33.
12. Sina Tabakhi, Parham Moradi and Fardin Akhlaghian. An unsupervised feature selection algorithm based on ant colony optimization // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2014. No. 32. P. 112–123.
13. Манусов В.З., Павлюченко Д.А. Оптимизация режимов электроэнергетических систем на основе эволюционных вычислений // Проблемы энергетики. 2002. № 1-2. С. 12–19.
14. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.
15. Gajendra Sahu and Kuldeep Swarnkar. Review of Reactive Power Optimization Using Evolutionary Computation Techniques // Advance in Electronic and Electric Engineering. 2014. No. 4. P. 73–82.
16. Кнут Д. Искусство программирования: в 3 т. / Пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 720 с.

References

1. Ayuev B.I., Davydov V.V., Yerokhin P.M., Neuymn V.G. *Vychislitel'nye modeli potokoraspredeleniya v elektricheskikh sistemah* [Computational models of flow distribution in electric systems]. Moscow: Flint's Publ., 2008, 256 p. (In Russian).
2. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 592 p. (In Russian).
3. Kavchenkov V.P., Solopov R.V. An algorithm of complex power system optimization with the use of generalized similarity criteria. *Programmnye produkty i sistemy*. [Software and Systems], 2013, no. 1, 23 p.
4. Solopov R., Kavchenkov V., Doletskaya L., Kiselev V. Effective solution of large-scale optimization problems using the similarity criteria. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, no. 12, pp. 3539–3541.
5. Solopov, R.V. Criterion complex optimization in electric-power systems. *Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 5, pp. 280–284.
6. Ortega D., Reynboldt V. Iteracionnye metody resheniya nelineynykh sistem uravneniy so mnogimi neizvestnymi [Iterative methods for solving nonlinear equation systems with many unknowns]. Moscow: World Publ., 1975, 560 p. (In Russian).
7. Amosov A.A., Dubinsky Yu.A., Kopchenova N.V. *Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov* [Computing methods for engineers]. Moscow: Publishing house the Higher school, 1994, 544 p. (In Russian).
8. Balametov A.B., Khalilov E.D. *About application of neural networks at calculations of the established modes of electric networks. Problemy ehnergetiki* [Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems], 2009, no. 1 pp. 21–31. (In Russian).
9. Hohlov M.V. *Raschety ustanovivshisya rezhimov EES s ispol'zovaniem nejronnykh setej* [Calculations of EPS steady-state modes with use of neural networks]. In the book: New information technologies in tasks of operational management of electrical power systems. Yekaterinburg: OURO RAHN Publ., 2002, pp. 102–126. (In Russian).
10. Panchenko T.V. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. Astrakhan: Astrakhan University publishing house, 2007, 87 p. (In Russian).
11. Yuancheng Li, Yiliang Wang and Bin Li. A hybrid artificial bee colony assisted differential evolution algorithm for optimal reactive power flow. *Electrical Power and Energy Systems*, 2013, no. 52, pp. 25–33.
12. Sina Tabakhi, Parham Moradi and Fardin Akhlaghian. An unsupervised feature selection algorithm based



on ant colony optimization. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, no. 32, pp. 112–123.

13. Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A. *Optimization of electrical power system modes on the basis of evolutionary calculations. Problemy ehnergetiki* [Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems], 2002, no. 1–2, pp. 12–19. (In Russian).

14. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2006, 320 p. (In Russian).

15. Gajendra Sahu and Kuldeep Swarnkar. Review of Reactive Power Optimization Using Evolutionary Computation Techniques. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 2014, no. 4, pp. 73–82.

16. Knut D. The art of computer programming, 2006, 720 p. (Russ. ed.: *Iskusstvo programmirovania*. Moscow, Vilams Publ., 2006, 720 p.)

Критерии авторства

Солопов Р.В., Самульченков А.С. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Solopov R.V., Samulchenkov A.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.



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ НАДЕЖНОСТИ В ТЕХНИКЕ

© Г.А. Федотова¹, И.А. Шер²

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева

Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ. Статья посвящена вопросам стандартизации в области надежности технических объектов и систем. На фоне общих проблем стандартизации в России рассмотрены проблемы, возникшие при разработке межгосударственных стандартов ГОСТ 27.002-2015³ «Надежность в технике. Термины и определения» и ГОСТ 18322-2016⁴ «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения». Сделан акцент на проблемах гармонизации стандартов с международным стандартом МЭК 60050-192⁵, обусловленных различием подходов к обеспечению надежности, методик и технологий технического обслуживания и ремонта техники в России и за рубежом. Рассмотрены вопросы их согласования с действующими национальными и межгосударственными стандартами, а также с другими терминологическими и нормативными документами. **МЕТОДЫ.** Разработка стандартов выполнялась в соответствии с программой работ по межгосударственной стандартизации на основе действующих стандартов, правил, норм и рекомендаций по стандартизации с учетом современных достижений науки и техники. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Разработанные стандарты ГОСТ 27.002-2015³ и ГОСТ 18322-2016⁴ отвечают современным требованиям по надежности, учитывают отечественный опыт стандартизации терминов в серии национальных стандартов ГОСТ 27.002 и гармонизированы с международным стандартом МЭК 60050-192⁵[1]. В основу стандартов положены современные принципы обеспечения надежности, технологии обслуживания и ремонта техники, принятые в России и за рубежом. По результатам рассмотрения в Росстандарте и их публичного обсуждения стандарты приняты Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации и вступили в силу. **ВЫВОДЫ.** Анализ действующих стандартов надежности, технического обслуживания и ремонта техники показал, что состояние фонда межгосударственных стандартов в этой области требует модернизации и совершенствования. При этом процесс реформирования стандартов в условиях перехода экономики России к рыночным отношениям должен быть адекватен происходящим переменам в соответствующих областях и отвечать международным требованиям. Особое внимание должно уделяться вопросам гармонизации национальных и межгосударственных стандартов с международными, чтобы обеспечить смысловое соответствие терминов с учетом различий методик и технологий. ГОСТ 27.002-2015³ и ГОСТ 18322-2016⁴ разработаны в соответствии с современными требованиями стандартизации, гармонизированы с международным стандартом МЭК 60050-192⁵.

Ключевые слова: межгосударственный стандарт, стандартизация, гармонизация, технический объект, термины и определения, техническое обслуживание.

Информация о статье. Дата поступления 13 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 22 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

¹Федотова Галина Алексеевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Отдела электроэнергетических систем ИСЭМ, e-mail: fedotova@isem.irk.ru

Galina A. Fedotova, Candidate of technical sciences, Senior Researcher of the Department of Electric Power Systems MESI, e-mail: fedotova@isem.irk.ru

²Шер Игорь Алексеевич, кандидат технических наук, ведущий инженер ИСЭМ, e-mail: sher@isem.irk.ru

Igor A. Sher, Candidate of technical sciences, Leading Engineer, MESI, e-mail: sher@isem.irk.ru

³ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. Введен в действие 2017–03–01 / Г.Н. Черкесов, В.А. Нетес, В.Л. Шпер, Ю.И. Тарасьев, Г.Ф. Ковалев, Г.А. Федотова, И.Н. Долгополов, И.Б. Шубинский, А.В. Батурин. Москва: Стандартинформ, 2016. / GOST 27.002-2015 Dependability in technics. Terms and definitions. En-acted 1 March 2017 / G.N. Cherkesov, V.A. Netes, V.L. Shper, Yu.I. Tarasiev, G.F. Kovalev, G.A. Fedotova, I.N. Dolgoplov, I.B. Shubinsky, A.V. Baturin. Moscow: Standartinform, 2016.

⁴ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Введен в действие 2017–09–01 / Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалев, Г.А. Федотова, И.А. Шер. Москва: Стандартинформ, 2017. / GOST 18322-2016. Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions. Inacted 1 September 2017 / N.I. Voropai, G.F. Kovalev, G.A. Fedotova, I.A. Sher. Moscow: Standartinform, 2017.

⁵IEC 60050-192: 2015. International electrotechnical vocabulary – Part192: Dependability. M.: International Electrotechnical Commission (IEC). 2015.



Формат цитирования: Федотова Г.А., Шер И.А. Современные проблемы стандартизации надежности в технике // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 142–152. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-142-152

CURRENT PROBLEMS OF RELIABILITY STANDARDIZATION IN ENGINEERING

G.A. Fedotova, I.A. Sher

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (MESI SB RAS),
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT. *The article deals with the issues of standardization in the field of reliability of engineering facilities and systems. The paper considers both general standardization problems in Russia and those that arose in the development of the interstate standards GOST 27.002-2015 “Reliability in engineering. Terms and definitions” and GOST 18322-2016 “Mechanical material maintenance and repair system. Terms and definitions”. The emphasis is placed on the harmonization of these standards with the international standard IEC 60050-192. Dissimilarity of standards is the result of different approaches to reliability provision, methods and technologies of equipment maintenance and repair in Russia and abroad. The issues of their coordination with current national and interstate standards, as well as with other terminological and reference documents are discussed. **METHODS.** The standards have been developed in accordance with the program of works on interstate standardization on the basis of current standards, rules, regulations and recommendations on standardization subject to the up-to-date advances in science and technology. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The developed standards GOST 27.002-2015 and GOST 18322-2016 meet modern reliability requirements, take into account the domestic experience in terminology standardization in the series of national standards GOST 27.002 and are harmonized with the international standard IEC 60050-192. The standards are based on the current principles of reliable equipment maintenance and repair technology provision that are adopted in Russia and abroad. Having been considered in Federal Agency for Technical Regulation and Metrology and publicly discussed, the standards were adopted by the Interstate Council on Standardization, Metrology and Certification and came into operation. **CONCLUSIONS.** The analysis of the current standards on reliability, maintenance and repair of equipment has shown that the state of the fund of interstate standards in this area requires modernization and improvement. However, the process of standard reformation in the context of Russian economy transition to market relations should be in tune with the changes occurring in the corresponding spheres and meet the international requirements. Special attention should be paid to the harmonization of national and interstate standards with international ones in order to ensure the semantic match of terms considering differences in techniques and technologies in Russia and abroad. GOST 27.002-2015 and GOST 18322-2016 are developed in accordance with modern requirements for standardization and are harmonized with the international reliability standard IEC 60050-192.*

Keywords: *interstate standard, standardization, harmonization, engineering facility, terms and definitions, maintenance*

Article info. Received December 13, 2017; accepted January 22, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Fedotova G.A., Sher I.A. Current problems of reliability standardization in engineering. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 142–152. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-142-152

Введение

В настоящее время во всех передовых в техническом отношении странах мира отмечается возрастающий интерес к вопросам стандартизации, ставятся и решаются задачи ее развития и практического использования. Целью стандартизации научно-технической терминологии на межгосударственном уровне является установление однозначно понимаемой и непротиворечивой терминологии в определенной области науки и техники, что обеспечивает взаимопонимание между исследователями, разработчиками, изготовителями, поставщиками и потребителями продукции, а также другими субъектами научно-технической и хозяйственной деятельности. В заданной

предметной области стандартизация терминологии позволяет создать единое информационное пространство, обеспечивающее научное, техническое, хозяйственно-экономическое и политическое общение. Стандартизация является одним из действенных средств ускорения технического прогресса, внедрения наиболее рациональной организации производства, улучшения качества продукции, экономии трудовых затрат и материальных ресурсов. В современных экономических условиях в мировой практике (в российской, в частности) придается важное значение стандартизации, поскольку в рыночных условиях успешная деятельность организаций бази-



руется на конкурентоспособности продукции и услуг, основу которой составляет их качество, напрямую зависящее от развития стандартизации во всех сферах деятельности.

Существующая в России практика национальной стандартизации в значительной степени соответствует международным нормам и правилам, общероссийский классификатор стандартов гармонизирован с международным, однако современный уровень национальной стандартизации не позволяет обеспечить в полной мере учет национальных интересов Российской Федерации при разработке международных стандартов и необходимый для промышленности и торговли уровень гармонизации национальных стандартов с международными. Существует определенный порядок и периодичность рассмотрения стандартов с целью их подтверждения, пересмотра или отмены, поскольку с течением времени в результате научно-технического прогресса и изменения хозяйственных механизмов могут измениться границы предметной области, появиться новые термины и понятия, требующие определений, систематизации и классификации. Стандарты могут быть подвергнуты ревизии, если потребуется обеспечить их гармонизацию с международными стандартами, т.е. привести их содержание в соответствие с международными стандартами для обеспечения возможности взаимозаменяемости продукции (услуг), взаимного понимания результатов испытаний и содержащейся в стандартах информации.

Современные проблемы стандартизации во многом обусловлены переходным периодом реформирования в области технического регулирования. В первую очередь это связано с отставанием научно-технического уровня стандартов от современных достижений науки и техники, замедлением темпов обновления национальных и межгосударственных стандартов и их

гармонизации с международными. Причинами низкого уровня обновления стандартов являются недостаточные темпы освоения международных, региональных и национальных стандартов: перевод (многие международные стандарты не переведены на русский язык либо имеют низкое качество перевода), редактирование, утверждение, внедрение, а также низкое качество работы специализированных технических комитетов. В итоге фонд стандартов стремительно стареет. Кроме того, продолжается отток специалистов по стандартизации из научно-исследовательских организаций и предприятий промышленности. Современное состояние фонда межгосударственных стандартов требует скорейшей модернизации, совершенствования и повышения эффективности работ по межгосударственной стандартизации в рамках Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации. В условиях перехода экономики России к рыночным отношениям процесс реформирования стандартизации должен быть адекватен происходящим переменам и соответствовать международным требованиям. Реализация Концепции развития национальной системы стандартизации Российской Федерации на период до 2020 года предполагает обеспечение ежегодного обновления фонда национальных стандартов в секторах экономики с высоким потенциалом развития на уровне 10–15%, гармонизации национальных стандартов с международными – на уровне 65–70%⁶.

Факторами, которые влияют на степень гармонизации стандартов, являются уровень ориентации экономики страны на внешнюю торговлю, емкость внутреннего рынка и т.д. В связи со вступлением Российской Федерации в ВТО разработан и вступил в силу Федеральный закон⁷ с изменениями и дополнениями, направленный на совершенствование национальной си-

⁶Концепция развития национальной системы стандартизации Российской Федерации на период до 2020 г.: распоряжение Правительства № 1762-р от 24.09.2012 г. / Development concept of the national standardization system of the Russian Federation for the period until 2020: Order of the Government No. 1762-p of 24 September 2012.

⁷О стандартизации в Российской Федерации: федер. закон № 162-ФЗ от 29.06.2015 г. / On standardization in the Russian Federation: Federal Law No. 162-FZ of 29 June 2015.



стемы стандартизации. Применяемая в нем терминология унифицирована с международной, прописаны требования к национальной системе стандартизации, федеральному органу исполнительной власти в сфере стандартизации, техническим комитетам по стандартизации, документам по стандартизации и т. д. Вступление в силу этого закона означает переход России к современной модели стандартизации, отличительной чертой которой является совместная работа представителей промышленности и органов государственной власти в сфере стандартизации, а его реализация должна стать не только действенной антикризисной мерой, но и важным элементом государственной промышленной политики. ФЗ-162⁷ направлен на проведение единой государственной политики в сфере стандартизации, регулирует отношения в сфере стандартизации, включая отношения, возникающие при разработке, утверждении, изменении, отмене, опубликовании и применении документов по стандартизации. Закон предъявляет повышенные требования к качеству стандартов и к их разработке, в частности:

– разработка стандартов должна вестись с учетом и использованием научных достижений в соответствующих областях;

– характеристики и требования, включаемые в стандарт, должны соответствовать передовому уровню науки и техники, основываться на результатах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;

– новые стандарты должны не только отвечать современным запросам, но и учитывать тенденции развития соответствующих отраслей;

– показатели, нормы, характеристики, требования, устанавливаемые в стандартах, должны соответствовать международным стандартам и учитывать рекомендации международных организаций;

– при разработке стандартов необходимо стремиться получить оптимальное сочетание устанавливаемых показателей, норм и требований к продукции и услугам с затратами на их достижение, обеспечить максимальный экономический эффект при минимальных затратах и т. д.

Цели и задачи исследований

Настоящие исследования проводились в области надежности, технического обслуживания и ремонта техники. Надежность – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции при заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Учитывая большое значение надежности в технике, вопросам ее стандартизации всегда уделялось большое внимание. Цели и задачи исследований определены необходимостью пересмотра и замены межгосу-

дарственных стандартов ГОСТ 27.002-89⁸ и ГОСТ 18322-78⁹, входящих в систему стандартов «Надежность в технике», которая обозначается как ГОСТ 27. Эта система была разработана в нашей стране более 20 лет назад и в настоящее время является межгосударственной, региональной системой стандартов стран СНГ.

При пересмотре действующих стандартов и разработке новых возникают разные трудности и проблемы. В настоящей статье на фоне общих проблем стандартизации, обозначенных выше, рассмотрены

⁸ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Москва: Изд-во стандартов. 1990. / GOST 27.002-89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and Definitions. Moscow: Publishing Standards. 1990.

⁹ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Москва: Изд-во стандартов. 1979; Москва: Стандартинформ. 2007 / GOST 18322-78. Equipment maintenance and repair system. Terms and Definitions. Moscow: Standards Publ. 1979; Moscow: Standartinform. 2007.



проблемы, которые возникли в процессе пересмотра межгосударственных стандартов ГОСТ 27.002-89⁸ и ГОСТ 18322-78⁹ и разработке новых^{3,4}. За период действия ГОСТ 27.002-89⁸ (26 лет) и ГОСТ 18322-78⁹ (38 лет) произошли большие перемены как в развитии теории надежности и техники, так и в условиях функционирования технических объектов и систем, появились новые методы расчета и обеспечения надежности, концепции и методологии технического обслуживания и ремонта оборудования. На этом фоне стали использоваться новые термины и определения, все это определило необходимость пересмотра указанных стандартов. Техническим комитетом по стандартизации ТК 119 «Надежность в технике» было принято решение об их пересмотре, определены организации-разработчики и созданы рабочие группы. Перед разработчиками были поставлены задачи создания новых межгосударственных стандартов ГОСТ 27.002-2015³ «Надежность в технике. Термины и определения» и ГОСТ 18322-2016⁴ «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения» на основе отечественного опыта стандартизации терминов в области надежности в серии национальных стандартов ГОСТ 27.002, гармонизированных с международным стандартом МЭК 60050-192⁵. При этом новые стандарты должны отражать современное понимание свойства надежности, учитывать происходящие в России перемены в производстве, управлении, развитии техники, в сфере технического обслуживания и ремонта технических объектов. Разработка новых стандартов дает возможность обобщить на терминологическом уровне знания и опыт в области надежности технических объектов и систем, накопленные более чем за 30 лет в разных отраслях промышленности и школах надежности, и внести соответствующие коррективы в понятийно-терминологический аппарат теории надежности [2, 3, 4].

Межгосударственный стандарт ГОСТ 27.002-2015³ разработан Институтом надежности машин и технологий с участи-

ем разработчиков из других организаций; внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 119 и Всероссийским научно-исследовательским институтом по стандартизации и сертификации в машиностроении; принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации. Стандарт устанавливает термины и основные понятия по надежности в технике, а также их определения, распространяющиеся на широкий круг технических объектов. Приведенные в стандарте термины рекомендованы для применения во всех видах документации и литературы, входящих в сферу действия стандартизации или использующих результаты этой деятельности. Положения стандарта рекомендованы к применению организациями Российской Федерации и Евразийского экономического союза, имеющими отношение к разработке, производству, эксплуатации и ремонту технических объектов. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии ГОСТ 27.002-2015³ введен в действие 01.03.2017 г. взамен ГОСТ 27.002-89⁸. Стандарт используется совместно с ГОСТ 18322-2016⁴. История вопроса разработки ГОСТ 27.002-2015³ рассмотрена в [2, 3].

Межгосударственный стандарт ГОСТ 18322-2016⁴ разработан сотрудниками Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) внесен Всероссийским научно-исследовательским институтом по стандартизации и сертификации в машиностроении Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии; принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации. Стандарт устанавливает термины и определения понятий в области технического обслуживания и ремонта техники. Термины рекомендованы для применения во всех видах документации и литературы, входящих в сферу действия стандартизации или использующих результаты этой деятельно-



сти. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии ГОСТ 18322-2016⁴ введен в действие

01.09.2017 г. взамен ГОСТ 18322-78⁹. Стандарт используется совместно с ГОСТ 27.002-2015³.

Анализ проблем и результаты исследований

В процессе работы над новыми стандартами возникли трудности при согласовании определений терминов между разработчиками-специалистами из разных технических отраслей и экспертами, а также с определениями, входящими в международный стандарт МЭК 60050-192⁵ и в другие национальные и межгосударственные стандарты. Главные проблемы связаны с гармонизацией стандартов с международным стандартом МЭК 60050-192⁵. Условия функционирования технических объектов различных отраслей техники в России весьма специфичны и отличны от зарубежных, что должно быть отражено в терминах межгосударственного стандарта по надежности при его гармонизации с международным. Сюда можно отнести весь комплекс вопросов резервирования, нормирования надежности, систем планово-предупредительных и восстановительных ремонтов, диагностирования и сложившихся традиций. Трудности согласования этих документов связаны также с разными подходами к использованию терминов и с различиями в менталитетах специалистов разных отраслей и стран.

Кроме того, согласование межгосударственных и международных стандартов затруднено несовершенством перевода текстов с одного языка на другой. С одной стороны, сказывается многозначность перевода слов, с другой – возможность разными словами определять одно и то же понятие. Например, английский термин *reliability* в переводе на русский язык имеет множество значений: это надежность, безотказность, достоверность и безопасность; *security* на русский язык переводится как надежность и безопасность; *dependability*

тоже означает надежность. Русский термин *техническое обслуживание* имеет несколько английских аналогов: *maintenance*, *servicing*, *maintenance service*, *engineering service* и т.д. Следовательно, при гармонизации необходим тщательный выбор английских аналогов для русских терминов, поскольку от этого зависят и трактовки понятий.

Другая проблема определений терминов связана с множественностью их трактовок, например, термин *восстановление* может означать и процесс, и событие, и состояние, в связи с этим ему можно дать несколько разных определений. Возникает вопрос: какое из них должно быть приведено в стандарте, если несколько определений одному термину давать нельзя, поскольку это противоречит основному принципу научной терминологии – взаимно однозначное соответствие между термином и его определением.

Создание новых стандартов происходило на фоне множества действующих, вновь разрабатываемых близких по тематике стандартов и других терминологических документов^{5,10} [4–6 и др.]. Возник вопрос: какие определения терминов, имеющиеся в других стандартах, и в каком виде должны использоваться в разрабатываемом документе? Существуют разные мнения: максимально использовать определения из действующих стандартов или выбирать только основные; редактировать и уточнять их или использовать в первоначальном виде, особенно это касается определений терминов из международного стандарта с учетом их неоднозначного перевода с английского языка на русский. Взаимоувязка действующих и вновь созда-

¹⁰ОСТ 45.152-99. Техническое обслуживание и ремонт средств электросвязи. Термины и определения. Москва: ЦНТИ "Информсвязь", 2000 / OST 45.152-99. Maintenance and repair of telecommunication facilities. Terms and Definitions. Moscow: TsNTI "Informsvyaz", 2000.



ваемых стандартов и нормативных документов по соответствующей тематике представляет большую проблему и требует проведения исследований, позволяющих в максимально возможной степени их согласовать.

С учетом сказанного в ГОСТ 27.002-2015³, внесены структурные изменения, скорректированы определения некоторых терминов, добавлены новые термины, в число которых вошли, например, такие: «технический объект», «элемент», «система», «опасное состояние», «восстанавливаемость», «техническое содержание», «мониторинг технического состояния», «мажоритарное резервирование», «замена», «запасная часть» «комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП)» и др.

При разработке стандарта ГОСТ 18322-2016⁴ возникли проблемы, частично рассмотренные выше, но главные трудности были связаны с его гармонизацией с международным стандартом МЭК 60050-192⁵ и согласованием с другими действующими стандартами. В первую очередь речь идет об отличиях в концепциях технического обслуживания и ремонта техники в разных отраслях России и за рубежом, которые должны быть отражены в терминах и определениях нового стандарта. Необходим учет новых разработок и методологий в сфере технического обслуживания и ремонта как в России, так и за рубежом. Учитывая важность проблем гармонизации, остановимся на их рассмотрении более подробно.

В промышленно развитых странах система организации ремонтно-профилактических работ называется по-разному, а именно: в Европе, США, Канаде – система обслуживания; в Японии, Южной Корее и других азиатских странах – система сохранения. Порядок выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту за рубежом разрабатывается заводами-изготовителями оборудования, который определяется в инструкциях по эксплуатации технических объектов и неукоснительно выполняется на производственных

предприятиях. Во всех зарубежных странах большое внимание уделяется нормированию затрат труда, времени остановки на восстановление работоспособности объектов и времени плановой замены сменных элементов. Снижение издержек на восстановление неисправных объектов и их составляющих – необходимое условие эффективной работы на конкурентном рынке. Специалисты из Японии и Южной Кореи считают, что для значительного увеличения прибыли от эксплуатации оборудования необходимо, чтобы ремонтно-восстановительные работы носили плановый характер. В Японии с целью экономии затрат на ремонты все работы по замене изношенных деталей даже в самых сложных объектах производятся по возможности на месте эксплуатации силами собственного специально подготовленного персонала.

Техническое обслуживание (ТО) за рубежом предназначено для поддержания и восстановления работоспособности технических объектов и подразделяется на профилактическое и корректирующее. Профилактическое ТО проводится с целью приостановки процесса ухудшения функционирования и уменьшения вероятности отказа, корректирующее – с целью восстановления производительности после обнаружения повреждения или отказа. Корректирующее ТО включает ремонты, которые выполняются для восстановления работоспособности. При этом ремонты с полной разборкой оборудования, как правило, не проводятся, а выполняются путем замены пришедших в негодность узлов и деталей на новые, заводского изготовления, ремонтно-механические цеха по изготовлению и восстановлению деталей практически отсутствуют. Такая система ТО и ремонта техники существует, например, в США, где для обеспечения возможности восстановления техники путем замены изношенных узлов и деталей на новые предприятия-изготовители резервируют до 25% своих производственных мощностей для выпуска такой продукции. Изготовление запасных частей поощряется тем, что их



разрешается продавать на 20–25% дороже, чем в виде собранного оборудования. Доля выполнения ремонтных работ силами специализированных ремонтных фирм не превышает 10% всего объема ремонтов в стране, преимущественно это наладка, испытания, модернизация, сложные регулировочные работы, реже – замена сложных составных частей объекта⁵ [5].

В разных технических отраслях России используются различные концепции ремонта и технического обслуживания. В энергетике, например, система технического обслуживания и ремонта отличается от зарубежной своей направленностью на восстановление работоспособности техники путем проведения плановых ремонтов [5]. Техническое обслуживание является основным профилактическим мероприятием, необходимым для обеспечения надежной работы оборудования между ремонтами и сокращения общего объема ремонтных работ. Техническое обслуживание делится на регламентированное и нерегламентированное. В ходе регламентированного ТО проводится диагностирование и контроль состояния оборудования, регулировка механизмов, чистка, смазка, продувка, добавка или смена изоляционных материалов и смазочных масел, выявляются дефекты эксплуатации и нарушения правил безопасности, уточняются перечень и объемы работ, подлежащих выполнению при очередном текущем или капитальном ремонте. В состав нерегламентированного ТО входят текущий надзор за работой оборудования, эксплуатационный уход, поддержание оборудования в работоспособном состоянии. Все обнаруженные при этом неисправности фиксируются в ремонтных журналах и устраняются силами эксплуатационного и ремонтного персонала при проведении плановых ремонтов. Другая концепция используется в сфере технического обслуживания средств электросвязи, где ТО делится на профилактическое и корректирующее. Профилактическое ТО выполняется через определенные временные интервалы в соответствии с заранее установленными критериями и направлено

на своевременное предупреждение возможности появления отказа или ухудшения функционирования объекта, корректирующее – после обнаружения отказа с целью возвращения объекта в работоспособное состояние¹⁰.

Плановые ремонты в России во всех отраслях техники являются основным видом управления состоянием технических объектов и служат для восстановления их работоспособности и эксплуатационного ресурса, что отражено в стандартах и других источниках¹⁰ [5–7]. Кроме плановых, возможны и неплановые ремонты, отличающиеся от аварийно-восстановительных тем, что при обнаружении повреждений или неисправностей они устраняются заранее до перехода объекта в состояние отказа. Ремонты совместно с техническим обслуживанием образуют систему технического обслуживания и ремонта (СТОиР). На практике используются две основные стратегии ремонтного производства: планово-предупредительных ремонтов и ремонтов по техническому состоянию. Планово-предупредительные ремонты проводятся через усредненные нормативные сроки без учета технического состояния оборудования. Такая стратегия дает возможность подготовить ремонты и выполнить их в нормативные сроки, повысить качество эксплуатации объекта и обеспечить необходимый уровень надежности любой системы, в которую входит объект, но не всегда является экономически целесообразной. Стратегия ремонтов по техническому состоянию – по принятой за рубежом терминологии Condition Based Maintenance (CBM) – состоит в том, что ремонты проводятся в зависимости от фактического состояния оборудования, определяемого с помощью методов и средств технической диагностики. По результатам мониторинга различных параметров, характеризующих работу объекта, можно вовремя обнаружить изменение его технического состояния и запланировать ремонт в те сроки, когда возможна реальная опасность отказа. Эта стратегия, получившая в последнее время значительное развитие, при исполь-



зовании современных систем технической диагностики позволяет более полно использовать технический ресурс оборудования, ведет к снижению количества ремонтных работ и наиболее эффективна при эксплуатации сложных объектов с большими затратами на ремонт.

За последние 20 лет в области технологий технического обслуживания и ремонта появились десятки новых разработок, позволяющих улучшить процесс ремонтного обслуживания. Самой современной и популярной является методика обслуживания, ориентированная на обеспечение безотказности, известная во всем мире как Reliability Centered Maintenance (RCM-методология) и реализованная во многих западных странах. Это метод определения соответствующих операций технического обслуживания и ремонта на основе вероятности и последствий отказа. RCM-методология концентрирует внимание на работоспособности системы в целом, а не каждой единицы оборудования в отдельности, и позволяет определить оптимальный набор и частоту действий, которые должны быть выполнены для того, чтобы система продолжала делать то, что от нее требуется в заданных условиях. Базирована мето-

дология на RCM-анализе, который может быть применен к любому техническому объекту с целью повышения надежности, предотвращения или уменьшения последствий отказов, и активно используется в авиации и атомной энергетике [8]. Все шире начинают применяться методы самовосстановления отказавших элементов и их автоматической замены работоспособными, возросла роль систем ЗИП и появились новые формы сервисного обслуживания ремонтных работ.

Необходимость гармонизации ГОСТ 18322-2016⁴ с международным стандартом МЭК 60050-192⁵ и учета новых методов и средств ТО и ремонта, новых показателей системы ТО и ремонта, перемен, произошедших в России в области надежности технического обслуживания и ремонта за последние десятилетия, в итоге потребовали значительных структурных изменений в ГОСТ 18322-78⁹ и введения новых терминов: «эшелон ТО», «дистанционное ТО», «ремонт по техническому состоянию», «комплексное ТО», «автономное ТО», «корректирующее ТО», «автоматизированное ТО», «ТО программного обеспечения» и др.

Заключение

Актуальность выполненной работы и проведенных при этом исследований определяется необходимостью модернизации и совершенствования фонда межгосударственных стандартов в области надежности техники путем пересмотра стандартов ГОСТ 27.002-89⁸ и ГОСТ 18322-78⁹. Цели и задачи исследований – создание межгосударственных стандартов на термины и определения в области надежности ГОСТ 27.002-2015³, технического обслуживания и ремонта техники ГОСТ 18322-2016⁴, отвечающих современным требованиям по надежности, учитывающих отечественный опыт стандартизации терминов в области надежности в серии национальных стандартов ГОСТ 27.002 и гармонизированных с международным стандартом МЭК 60050-

192⁵. При разработке новых стандартов использовались результаты методических разработок и опыт исследований в области надежности систем энергетики, ТО и ремонта энергетического оборудования, накопленный в СЭИ-ИСЭМ СО РАН¹¹ [4, 6–8]. Работа над стандартами выполнялась в несколько этапов, каждый этап завершался выпуском соответствующей редакции каждого стандарта, которые отправлялись в Росстандарт для рассмотрения и обсуждения. По результатам публичного обсуждения с учетом отзывов от специалистов в области надежности, технического обслуживания и ремонта разных отраслей техники Российской Федерации и стран СНГ, стандарты приняты Межгосударственным советом по стандартизации,



метрологии и сертификации и вступили в силу.

В процессе пересмотра ГОСТ 27.002-89⁸ некоторые термины и определения отредактированы, устаревшие удалены, введены новые, что в итоге привело к увеличению общего количества терминов со 116 до 146. В связи с развитием теории надежности и ее технических приложений практически во всех разделах появились новые термины с соответствующими определениями, некоторые разделы получили развитие, например, такие: «Разработка, обеспечение, анализ», «Показатели надежности», «Техническое обслуживание, восстановление и ремонт».

При пересмотре ГОСТ 18322-78⁹ устаревшие термины удалены и введены новые, в результате общее количество терминов в ГОСТ 18322-2016⁴ составило 105 вместо 61. При разработке нового стандарта учтены особенности современных концепций технического обслуживания и ремонта в разных отраслях техники в России и за рубежом, специфика ремонтного обслуживания новых видов оборудования и новых технологий. Введены термины с соответствующими определениями, связанные с появлением и развитием новых стратегий технического обслуживания и ремонта (CBM, RCM), информационно-коммуникационных технологий и средств автоматического управления и регулирова-

ния. Поскольку все чаще в России, как и за рубежом, становится востребованной процедура поддержания и восстановления работоспособности технических объектов путем установки запасных частей вместо изношенных или отказавших элементов и узлов, возрастает роль использования ЗИП, то в структуру стандарта введены соответствующие термины и их определения.

Разработанные стандарты ГОСТ 27.002-2015³ и ГОСТ 18322-2016⁴ входят в состав системы межгосударственных стандартов надежности в технике, отражают современное понимание свойства надежности, соответствуют требованиям межгосударственных стандартов, метрологическим правилам и нормам, применяемой терминологии. Эффективность применения этих стандартов заключается в способности содействовать основной задаче терминологической нормативной документации, грамотному общению и однозначному пониманию технической документации специалистами – заказчиками, разработчиками, изготовителями, эксплуатационниками, надзорными органами.

Работа выполнена в рамках базового проекта программы СО РАН III 17.5.3. "Методические основы учета фактора надежности при управлении развитием интеллектуальных энергетических систем", рег. № АААА - А 17 - 117030310450-3.

¹¹Постановлением Президиума СО РАН в 1997 г. Сибирский энергетический институт (СЭИ) переименован в Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ). / The Siberian Energy Institute (SEI) was renamed Melentiev Energy Systems Institute by the resolution of the Presidium of the SB RAS in 1997.

Библиографический список

1. Тарасьев Ю.И., Дунаевский С.Н. Гармонизация стандартов и технических регламентов: какой она должна быть? // Стандарты и качество. 2014. № 3. С. 34–38.
2. Федотова Г.А., Воропай Н.И., Ковалев Г.Ф. Надежность технических объектов. Вопросы стандартизации // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 4. С. 2–6.
3. Fedotova G.A., Voropai N.I. and Kovalev G.F. Dependability of Technical Items: Problems of Standardization // Thermal Engineering. 2016, vol. 63, no. 14, pp. 978–982. (In Russian) DOI: 10.1134/S0040601516140056.
4. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник в 4-х томах. / Под общей редакцией Ю.Н. Руденко. Том 1: Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / Под ред. Ю.Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат. 1994.
5. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: Справочник. М.: НЦ ЭНАС, 2006. 360 с.



6. Надежность систем энергетики (Сборник рекомендуемых терминов) / Отв. ред. Н.И. Воропай. М.: ООО «Издательско-аналитический центр Энергия». 2007. 192 с.
7. Воропай Н.И., Федотова Г.А. Планирование ремонтов электрогенерирующего оборудования в рыночной среде с учетом надежности // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 7. С. 179–184.

8. Дьяков А.Ф., Стенников В.А., Сендеров С.М. Надежность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения. Новосибирск: Наука. 2014. 284 с.

References

1. Tarasiev Yu.I., Dunaevsky S.N. Harmonization of standards and technical regulations: what should it be like? *Standarty i kachestvo* [Standards and quality]. 2014, no. 3, pp. 34–38. (in Russian).
2. Fedotova G.A., Voropai N.I., Kovalev G.F. Reliability of engineering facilities. Issues of standardization. *Nadezhnost' i bezopasnost' jenergetiki* [Safety and Reliability of Power Industry]. 2015, no. 4, pp. 2–6. (in Russian).
3. Fedotova G.A., Voropai N.I. and Kovalev G.F. Dependability of Technical Items: Problems of Standardization. *Thermal Engineering*. 2016, vol. 63, no. 14, pp. 978–982. (in Russian). DOI: 10.1134/S0040601516140056.
4. *Nadezhnost' sistem jenergetiki i ih oborudovaniya. Spravochnik v 4-h tomah / Pod obshhej redakciej Ju.N. Rudenko. Tom 1: Spravochnik po obshhim modeljam analiza i sinteza nadezhnosti sistem jenergetiki / Pod redakciej Ju.N. Rudenko* [Reliability of power engineering systems and their equipment. Reference book in 4 volumes / Under the general editorship of Yu.N. Rudenko. Volume 1: A Reference book of general analysis

and synthesis models of energy system reliability]. M.: Energoatom Publ., 1994, 480 p. (in Russian).

5. Yashchura A.I. *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta obshchepromyshlennogo oborudovaniya: Spravochnik*. [Maintenance and repair system of general industrial equipment: Reference book]. Moscow: Novation Center ENAS Publ., 2006, 360 p. (in Russian).

6. *Nadezhnost' sistem jenergetiki (Sbornik rekomenduemyh terminov)* [Reliability of energy systems (Collection of recommended terms)]. M.: ООО "Publishing and Analytical Center Energia" Publ., 2007, 192 p. (in Russian).

7. Voropaj N.I., Fedotova G.A. Planning maintenance of power generating equipment in market environment with regard for reliability. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2010, no. 7, pp. 179–184. (in Russian).

8. D'jakov A.F., Stennikov V.A., Senderov S.M. *Nadezhnost' sistem jenergetiki: Problemy, modeli i metody ih reshenija* [Reliability of energy systems: Problems, models and their solution methods]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2014, 284 p. (in Russian).

Критерии авторства

Федотова Г.А., Шер И.А. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Fedotova G.A., Sher I.A. 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 620.181.4, 666.3-135

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-153-165>

К ВОПРОСУ О НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ СИНТЕЗЕ ДИБОРИДА ТИТАНА

© Е.С. Горланов¹, В.Л. Уголков²

¹ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ»,

Российская Федерация, 199106, г. Санкт-Петербург, 20-я линия В.О., 5/7.

²ФГБУН Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,

Российская Федерация, 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Определение температурных интервалов процессов дегидратации и фазовой трансформации исходных компонентов смеси $TiO_2-B_2O_3-C$ – сахарозы, гидратированных оксидов титана и бора в различных условиях синтеза диборида титана. **МЕТОДЫ.** Термический анализ реакционной смеси на установке синхронного термического анализа STA 429CD (NETZSCH) с использованием платино-платинородиевого держателя для образцов типа «TG+DSC» в атмосферах гелия, аргона, вакуума и воздуха. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Превращение борной кислоты происходит при температурном интервале $73 \div 450^\circ C$ в три этапа: на первом – с удалением 1 моля воды ортоборная кислота H_2TiO_3 переходит в метаборную HBO_2 , которая с дальнейшим испарением влаги превращается в борный ангидрид B_2O_3 . На третьем этапе полное удаление влаги происходит в течение плавления оксида бора в температурном интервале $300 \div 600^\circ C$. Допированный фтором гелеобразный оксид титана $TiO(OH)_{2-x}F_x$ теряет влагу при $65 \div 130^\circ C$, но только после нагрева выше $700^\circ C$ его аморфная форма $TiO_{2-x}F_x$ претерпевает свой первый фазовый переход в кристаллическую анатазную модификацию $\alpha-TiO_2$. Наибольшая трансформация и глубина восстановления оксида титана происходят при нагреве реакционной смеси в атмосфере воздуха. Пиролиз сахарозы $C_{12}H_{22}O_{11}$ до полного удаления влаги и выделения активного углерода является преобладающим процессом в широком температурном интервале $350 \div 740^\circ C$. **ВЫВОДЫ.** По результатам термического анализа образцов исходного реакционного состава в различных атмосферных условиях установлены температурные интервалы процессов дегидратации и трансформации компонентов смеси. Установленные закономерности необходимо учитывать и использовать при осуществлении низкотемпературного синтеза диборида титана TiB_2 .

Ключевые слова: анатаз-рутил трансформация, карботермическое восстановление, низкотемпературный синтез, диборид титана, динамический вакуум, регулируемая атмосфера.

Информация о статье. Дата поступления 16 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 24 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Горланов Е.С., Уголков В.Л. К вопросу о низкотемпературном синтезе диборида титана // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 153–165. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-153-163

TO THE LOW-TEMPERATURE SYNTHESIS OF TITANIUM DIBORIDE

E.S. Gorlanov, V.L. Ugol'kov

EXPERT-AL LLC,

5/7 20 Liniya V.O., St. Petersburg, 199106, Russian Federation

Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences (ISC RAS),

2 naberezhnaya Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to determine the temperature ranges of dehydration and phase transformation of the initial components of the mixture of $TiO_2-B_2O_3-C$ – sucrose, hydrated titanium and boron oxides under different conditions of titanium diboride synthesis. **METHODS.** The method used in the study is thermal analysis of the reaction mixture on the STA 429CD (NETZSCH) synchronous thermal analysis unit using a platinum-platinum-rhodium holder for “TG + DSC” type samples in helium, argon, vacuum and air atmospheres. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Boric acid is transformed in three stages at the temperature range of $73 \div 450^\circ C$: at the first stage the removal of

¹Горланов Евгений Сергеевич кандидат технических наук, заместитель генерального директора, e-mail: gorlanove@yandex.ru

Evgeny S. Gorlanov, Candidate of technical sciences, Deputy Director General, e-mail: gorlanove@yandex.ru

²Уголков Валерий Леонидович кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЛИН, e-mail: ugol'kov.52@mail.ru

Valery L. Ugol'kov, Candidate of technical sciences, Senior Researcher of the Nanostructure Research Laboratory, e-mail: ugol'kov.52@mail.ru



1 mole of water causes the transformation of the orthoboric acid H_2TiO_3 into the metaboric HBO_2 , which is transformed into boric anhydride B_2O_3 with further evaporation of moisture. The third stage features complete removal of moisture under the melting of boron oxide in the temperature range of $300 \div 600^\circ\text{C}$. The fluorine-doped titanium oxide $TiO(OH)_{2-x}F_x$ loses moisture in the temperature range of $65\text{--}130^\circ\text{C}$, but its amorphous form $TiO_{2-x}F_x$ undergoes its first phase transition to the crystal anatase modification of $\alpha\text{-}TiO_2$ only after heating above 700°C . The greatest transformation and reduction depth of titanium oxide occur when the reaction mixture is heated in the air atmosphere. Pyrolysis of sucrose $C_{12}H_{22}O_{11}$ to complete removal of moisture and release of active carbon is a predominating process in a wide temperature range of $350\text{--}740^\circ\text{C}$. **CONCLUSIONS.** Based on the thermal analysis results of the samples of the initial reaction composition under different atmospheric conditions the temperature ranges of the dehydration and transformation processes of mixture components have been determined. Found regularities must be accounted and applied under the low-temperature synthesis of titanium diboride TiB_2 .

Keywords: anatase-rutile transformation, carbothermic reduction, low-temperature synthesis, titanium diboride, dynamic vacuum, controlled atmosphere.

Article info. Received December 16, 2017; accepted January 24, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Gorlanov E.S., Ugolkov V.L. To the low-temperature synthesis of titanium diboride. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 153–163. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-153-165

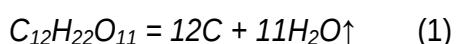
Введение

Разработка и реализация технологии карботермического синтеза диборида титана при относительно низких температурах требует понимания процессов, происходящих с реакционной смесью $TiO_2\text{--}B_2O_3\text{--}C$ в процессе всего периода нагрева и в различных атмосферных условиях. С одной стороны, это продиктовано сложными последовательными фазовыми превращениями применяемых борной H_3BO_3 , титано-

вой H_2TiO_3 кислот и сахарозы $C_{12}H_{22}O_{11}$ при нагреве до температуры синтеза диборида титана. С другой – условие синтеза TiB_2 при температурах до 1100°C вызывает необходимость определения наиболее благоприятных условий инициации и полноты восстановления TiO_2 до оксидных и оксикаридных фаз с наибольшей реакционной способностью по отношению к борсодержащим соединениям.

Пиролиз сахарозы

В источниках имеется достаточно сведений о превращениях сахарозы при нагреве [1]. При последовательном обезвоживании сахарозы в процессе нагрева удаляются молекулы воды и функциональные группы ($-\text{OH}$, $\text{O}=\text{C}$, $-\text{COOH}$ и др.), образуются вещества с увеличением количества углерода в составе $C_m(H_2O)_n$ с непрерывным изменением соотношения $m : n$ — от 1,09 (у сахарозы) до 3,0. Пиролиз сахарозы до полного обезвоживания описывается реакцией:



Теоретический выход углерода составляет 42%, остальная часть исходной массы сахарозы теряется в виде газообразных продуктов (H_2O).

В зависимости от давления водяного пара и присутствия ортоборных кислот, дегидратация H_3BO_3 (табл. 1) может протекать по разным направлениям³ [1, 4, 5]. В вакууме различной глубины при общем давлении водяного пара и борной кислоты в газовой фазе от 1,3 до 8,7 кПа, при атмосферном давлении 100 кПа и при некотором избыточном давлении до 131,7 кПа борная кислота может переходить непосредственно в борный ангидрид при темпе-

³Карпова Т.Р. Формирование активной поверхности боратосодержащих катализаторов олигомеризации легких алкенов: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04. Омск, 2014. 160 с. / Karpova T.R. Formation of the active surface of borate-containing catalysts for light alkene oligomerization: Candidate's Dissertation in technical sciences: 02.00.04. Omsk, 2014. 160 p.



ратурах ниже 100°C, в метаборную кислоту HBO_2 или вязкие, пучащиеся гидраты неопределенного состава $xH_2O \cdot yH_2O$ при температурах до 200°C.

В то же время литературных сведений по критическим температурным интервалам при нагреве сахарозы недостаточно [6], а данные по термическому анализу борной кислоты имеют противоречивый характер [7–11].

Исследования гидратированного оксида титана (табл. 2) методом термического анализа (ТА) также дают противоречивую информацию о локализации процессов дегидратации и полиморфных превращений в течение разогрева материала^{4,5,6} [12, 13]. По-видимому, решающее влияние на удаление адсорбированной и кристаллизационной воды, на начало и окончание фазовых переходов, имеет размер исходных

частиц или агломератов аморфного гидроксида титана. Этот размер частиц и их размерная однородность в составе аморфных гелей зависит от исходных компонентов и условий золь-гель процесса (температура pH растворов, дополнительная обработка).

Тем не менее, имеющиеся литературные данные позволяют с большей уверенностью анализировать и определять процессы дегидратации исходной смеси при нагреве.

Обычно детальный способ разложения веществ в закрытых системах не различают, но инструментарий ТА по признакам поведения кривых TG, DTG, DSC и IC позволяет в некоторых случаях косвенно разделять этот процесс – прямой или поэтапный.

Таблица 1

Дегидратация борной кислоты в различных условиях

Table 1

Dehydration of boric acid in various conditions

Давление в системе, кПа / Pressure in the system, kPa	1,3÷2,0	2,7÷6,7	8,7÷ 131,7	23 ÷100
Процессы дегидратации / Dehydration processes	Температура дегидратации, °C / Dehydration temperature, °C			
$2H_3BO_3 = B_2O_3 + 3H_2O$	96	–	–	–
$H_3BO_3 \rightarrow HBO_2 + H_2O$	–	84–96	101–156	118–144
$HBO_2 \rightarrow xB_2O_3 \cdot yH_2O$	–	118–143	147–178	179–194
$xH_2O \cdot yH_2O \rightarrow xB_2O_3 + yH_2O$	–	145–150	–	–

⁴Ильяева М.В. Пероксидный метод получения фотокатализаторов на основе SiO_2/TiO_2 : дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04. Челябинск, 2015. 141 с. / Ilkaeva M.V. Peroxide method of photocatalyst production based on SiO_2/TiO_2 : Candidate's Dissertation in Chemical Sciences: 02.00.04. Chelyabinsk, 2015. 141 p.

⁵Тихонов В.А. Разработка технологии нанодисперсного диоксида титана из растворов тетрахлорида титана: дис. ... канд. хим. наук: 05.17.01. Пермь, 2016. 126 с. / Tikhonov V.A. Development of the technology of nanodispersed titanium dioxide from titanium tetrachloride solutions: Candidate's Dissertation in Chemical Sciences: 05.17.01. Perm, 2016. 126 p.

⁶Смирнова В.В. Разработка технологии получения функциональных сорбентов на основе TiO_2 : дис. ... канд. хим. наук: 05.17.11. Томск, 2014. 195 с. / Smirnova V.V. Development of the technology of functional sorbent production based on TiO_2 : Candidate's Dissertation in Chemical Sciences: 05.17.11. Tomsk, 2014. 195 p.



Таблица 2

Температура тепловых эффектов и соответствующие процессы
при термоанализе гидратированных образцов оксида титана

Table 2

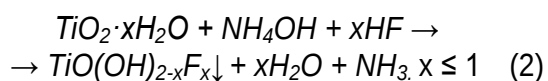
Temperature of thermal effects and corresponding processes
under thermal analysis of hydrated samples of titanium oxide

Вещество / Substance	Атмос- фера / Atmos- phere	Температурный пик/интервал, °C / Thermal spike/ temperature range, °C					Ссылка Refer- ence
		Эндотермические эффекты / Endothermal effects			Экзотермические эффекты / Exothermal effects		
		1	2	3	1	2	
Сахар / Sugar	Air	85 -H ₂ O	115 -H ₂ O	180 Плавление / Melting	–	–	[6]
H ₃ BO ₃	N ₂	159 -H ₂ O	181 -H ₂ O	–	–	–	[7]
Оксид титана / Titanium oxide	Ar	148 -H ₂ O	–	–	412Аморф / Amorth → a-TiO ₂	–	[12]
	–	130 -H ₂ O	–	–	438Аморф / Amorth → a-TiO ₂	800-900 a-TiO ₂ → r- TiO ₂	5
	Ar *	100 -H ₂ O	–	–	610 Аморф / Amorth → a-TiO ₂	–	⁶ [13]
-H ₂ O – испарение влаги / water evaporation							
* – с предварительной ультразвуковой обработкой / with preliminary ultrasonic treatment							

Эксперимент

Подготовка реакционной смеси к термическому анализу. Термическому анализу подвергались образцы исходной реакционной смеси, подготовленной растворным методом (золь-гель технология по методике [14]) и включающей:

- Оксид титана в гидратированной форме метатитановой кислоты ($H_2TiO_3 = TiO_2 \cdot H_2O = TiO(OH)_2$). Технология подготовки смеси предполагала модифицирование (допирование) H_2TiO_3 фтор-ионом с использованием гидролиза по схеме:



В присутствии фтористоводородной кислоты (источник фтор-иона) и гидроксида аммония (активатор гидролиза и

регулятор pH) процесс протекает с образованием комплекса метатитановой кислоты $TiO(OH)_{2-x}F_x \downarrow$.

- Оксид бора в гидратированной форме борной кислоты ($H_3BO_3 = 1/2B_2O_3 \cdot 3/2H_2O$).

- Сахароза – источник углерода ($C_{12}H_{22}O_{11}$).

Таким образом, исходные образцы представляли собой смесь оксигидратов титана, бора и сахарозы расчетного состава в мольном соотношении $1TiO_2 - 10,5B_2O_3 - 17C$. Такая смесь с избытком бора и углерода составлена для более отчетливого проявления и фиксации процессов дегидратации, полимеризации и фазообразования, происходящих при разогреве образцов до температуры синтеза.

Вместе с тем, для проведения термического анализа требовалось понизить



уровень органики в исходной реакционной смеси, опасной для аппаратуры. Органика содержится в сахарозе, которая плавится при температуре $186\div 188^{\circ}\text{C}$. Поэтому образцы реакционной смеси для ТА предварительно были высушены и нагреты в атмосфере воздуха до 500°C с 30-минутной выдержкой. Предполагалось, что в течение выдержки при этой температуре из составляющих смеси удаляется основное количество органики и влаги.

Термический анализ образцов исходной реакционной смеси $\text{TiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-C}$.

Термический анализ выполнялся на установке синхронного термического анализа STA 429CD (NETZSCH) с использованием платино-платинородиевого держателя для образцов типа «TG+DSC». Для анализа газообразных продуктов разложения был использован квадрупольный масс-спектрометр QMS 403C (NETZSCH), позволяющий анализировать продукты термического разложения в интервале от 1 до 121 атомно-зарядных единиц.

При анализе производилось одновременное определение изменений массы образца в процентах от величины навески (% , кривая TG) и изменений энтальпии в микроваттах на миллиграмм (mW/mg, кривая DSC), сопровождающих термические трансформации, а также кривые изменения

величин ионных токов (кривые IC), обусловленных различными массами ионов продуктов термического разложения.

Порошок исходной реакционной смеси компактировался при давлении прессования $4\text{--}10\text{ кгс/мм}^2$ в таблетку диаметром 5,1 мм, высотой до 1 мм и массой около 30 мг. Таблетки, взвешенные с точностью до 0,01 мг, помещались в открытый корундовый тигель и подвергались комплексному термическому анализу в атмосферах гелия (марка А), аргона (с 2 об. % водорода) и воздуха с предварительной двукратной откачкой среды до 5×10^{-5} Бар и последующим напуском газа. В этих экспериментах нагрев и охлаждение осуществляли до 1100°C со скоростью 20 градусов в минуту. Еще один ТА осуществлялся в условиях динамического вакуума при постоянной откачке пространства печи до вакуума на уровне 5×10^{-5} Бар в интервалах температур:

– от 40 до 900°C со скоростью 20°C в минуту;

– от 900 до 1100°C со скоростью 2°C в минуту.

Перед и после термического анализа исследуемые таблетки фотографировались с помощью микроскопа типа МПБ-2 при 24-кратном увеличении.

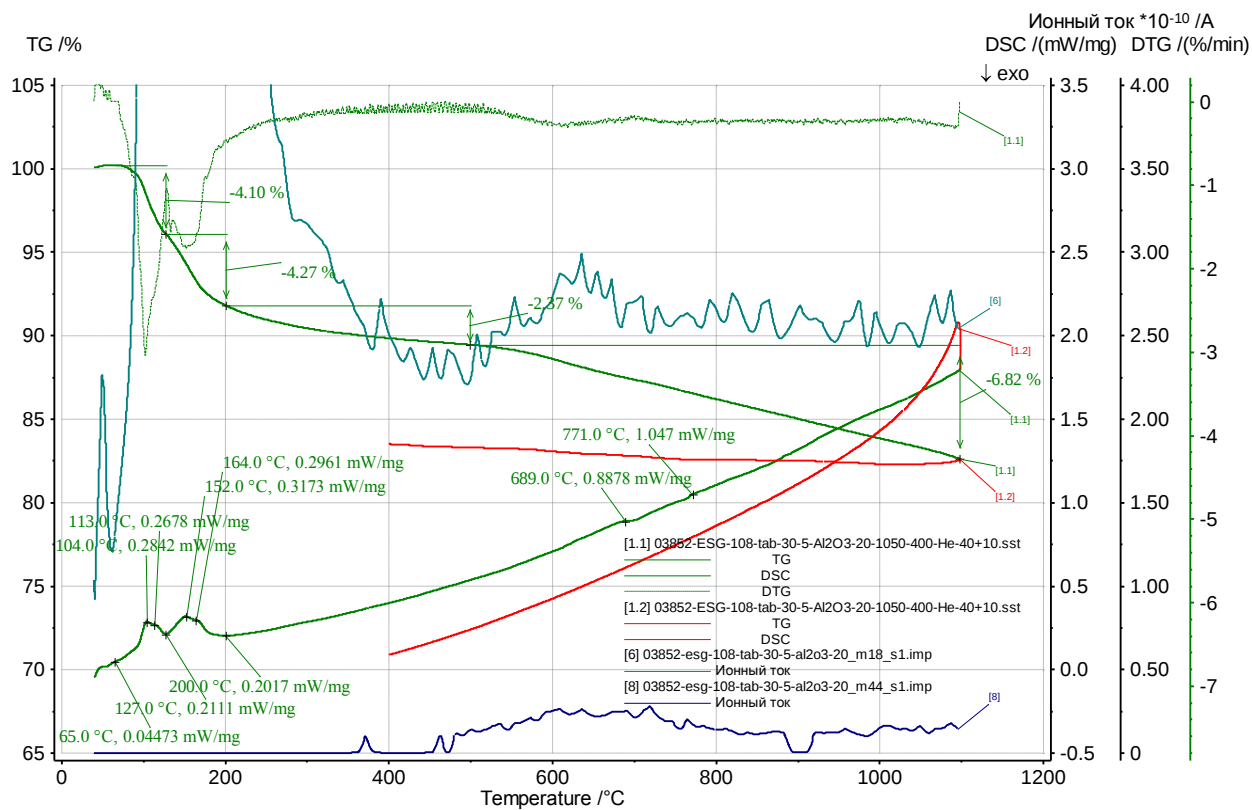
Результаты эксперимента

На рис. 1 представлены результаты термического анализа образцов в различных атмосферах. На всех кривых потерь массы (TG) имеются три-четыре ступени с чередованием монотонных участков.

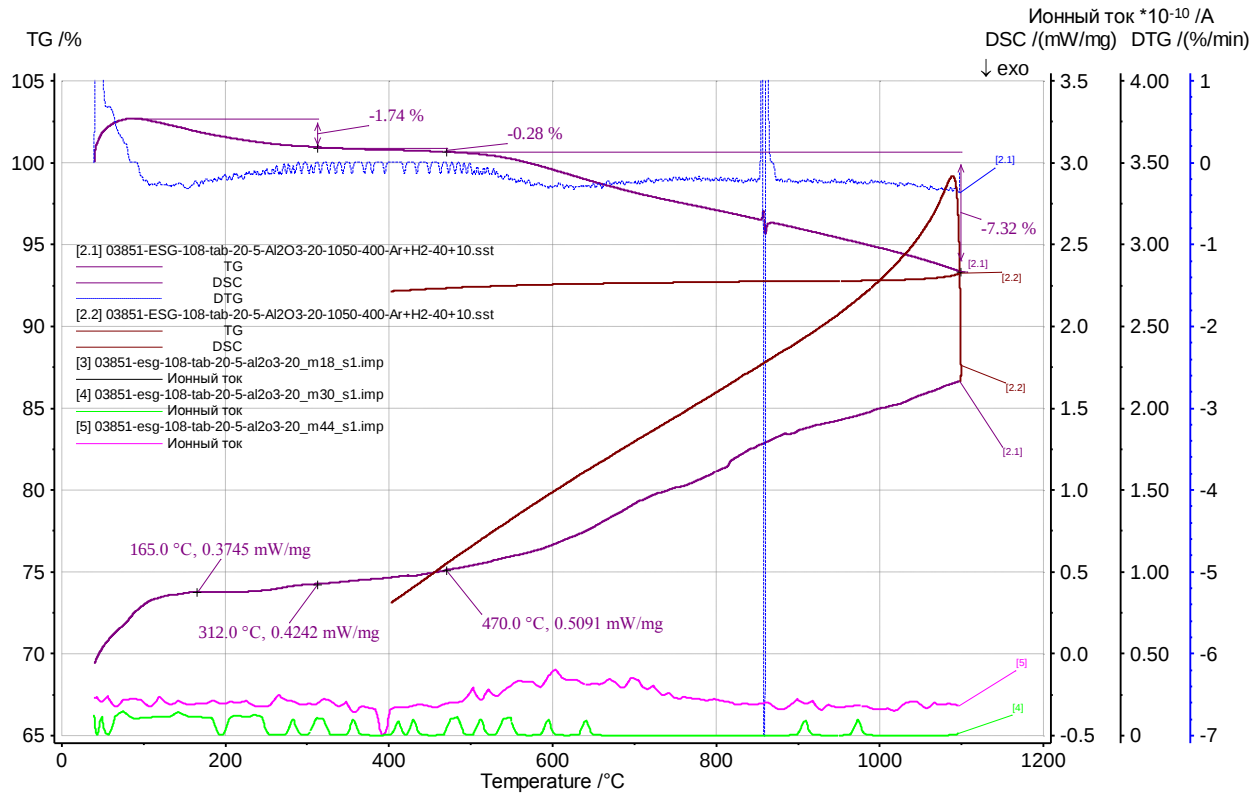
Интерпретация поведения кривых TG, DTG, DSC и IC в виде течения последовательно-параллельных процессов не вызывает затруднений. Исключение составляет ход кривой TG в вакууме с постоянными колебаниями и отклонениями в сторону увеличения массы, что делает невозможным использование данных термогравиметрии. Увеличение массы образца мнимое и связано с непрерывной откачкой газовых продуктов от поверхности образца,

т.е. с созданием в камере динамического разряжения, вызывающего ложное отклонение весов. Тем не менее, воздействие разряжения на ход кривых DTG, DSC и IC минимальное и их изменения с некоторыми оговорками можно комментировать.

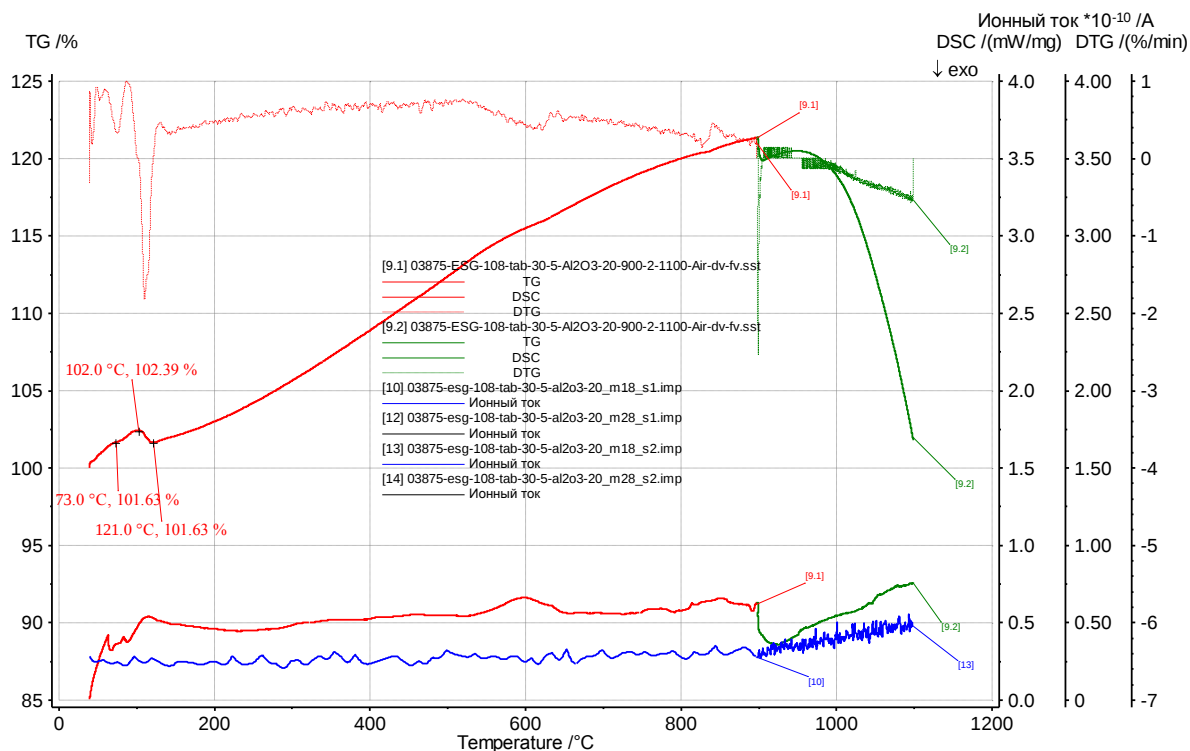
Основные процессы во всех экспериментах и их последствия, регистрируемые приборами, совпадают. Но присутствуют некоторые различия на всех этапах, связанные с условиями разогрева реакционной смеси. В этой связи для обобщения результатов ТА будет полезным представить сравнительное описание основных этапов нагрева в табличной форме (см. табл. 3).



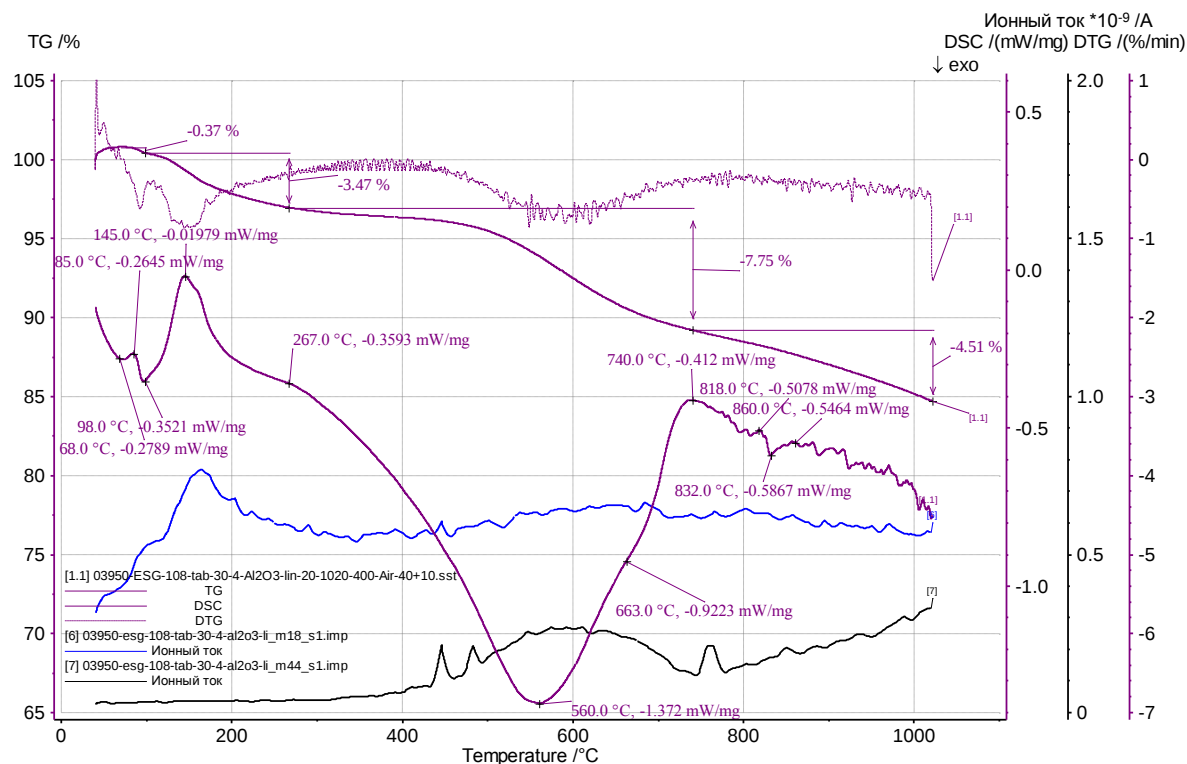
a



b



c



d

Рис. 1. Термический анализ (кривые TG, DTG, DSC и IC) при нагревании от 40 до 1100 °C со скоростью 20 °C в минуту: а – гелий He марки «А»; б – аргон Ar + 2 об. % H₂; в – вакуум; d – воздух
Fig. 1. Thermal analysis (curves TG, DTG, DSC and IC) under heating from 40 to 1100 °C at a rate of 20 °C per minute: а – helium He of the «А» brand; б – argon Ar + 2 vol. % H₂; в – vacuum; d – air



Обсуждение результатов термического анализа

Прежде всего обратим внимание, что основной причиной потерь массы и эндотермические пики в температурном интервале до 300°C принадлежат реакциям дегидратации слабосвязанной воды борной и титановой кислот в составе реакционной смеси. Это подтверждает существующие литературные данные и не является необычным, поскольку все компоненты смеси изначально содержат химически связанную воду, а приготовление смеси производится растворным методом. С другой стороны, очевидно, что в течение предварительного разогрева исходных порошков смеси до 500°C в течение 30 минут процессы удаления воды и полимеризации компонентов реакционной смеси происходили только частично. Кроме того, при охлаждении и

ожидании анализа борный ангидрид B_2O_3 легко гидролизует с образованием борных кислот. Оксид титана в различной степени обезвоживания $TiO(OH)_{2-x}$ также обладает высокой гигроскопичностью.

Потери массы происходят также в процессах полимеризации сахарозы в течение ее пиролиза с образованием углеродсодержащих газов и перехода в новое качество – углерод. Кроме того, фазовые переходы оксида титана из его аморфной формы в кристаллическую анатазную и рутильную также меняют общую массу смеси. И, наконец, существенные потери массы происходят в процессах последовательного восстановления оксидов титана с выделением углеродсодержащих газов.

Таблица 3

Динамика процессов дегидратации и восстановления реакционной смеси $TiO_2 - B_2O_3 - C$ в процессе термического анализа

Table 3

Dehydration and reduction dynamics of $TiO_2 - B_2O_3 - C$ reaction mixture in the process of thermal analysis

Текущие процессы / Current processes	Температурные интервалы/пики тепловых эффектов, °C Temperature ranges/ thermal effect spikes, °C							
	Гелий / Helium		Аргон / Argon		Вакуум / Vacuum		Воздух / Air	
$TiO(OH)_{2-x}F_x \cdot 2H_2O \rightarrow TiO(OH)_{2-x}F_x + 2H_2O \uparrow$	65÷127	4,1	–	–	–	–	–	–
	104							
$TiO(OH)_{2-x}F_x \rightarrow TiO_{2-x}F_x + H_2O \uparrow$	65÷127		85÷312	1,8	40÷73		68÷98	0,4
	113		65		85			
$H_3BO_3 \rightarrow HBO_2 + H_2O$	127÷200	85÷312	73÷121		98÷267	3,5		
	152	165	102	145				
$2HBO_2 \rightarrow B_2O_3 + H_2O$	127÷200	312÷470	0,3	121÷300	267÷450		7,7	
	164							
$B_2O_3 (мг.) \rightarrow B_2O_3 (ж.)$	300÷565	470÷530		300÷525	350÷600	4,5		
$C_{12}H_{22}O_{11} = 12C + 11H_2O \uparrow$	450÷700	470÷650		530÷750	350÷740			
	689	550–650		600	560			
$C + O_2 = CO_2$	–	6,8	–	7,3	–	350÷740	–	
						663		
$TiO_{2-x}F_x \rightarrow a-TiO_{2-x} + xF$	710÷820		650÷850		750÷900	740÷818		
		700			800	4,5		
$B_2O_3 + Al_2O_3 = 2Al_2O_3 \cdot B_2O_3$	–	–	–	818÷860				
				832				
$a-TiO_{2-x} \rightarrow r-TiO_2$	710 ÷ 820	6,8	650÷850	7,3	750÷900	740–960	4,5	
	771		820		840	888		
$4TiO_2 + C = Ti_4O_7 + CO$	820÷1100		850÷1000		900÷1100	910÷960		
		6,8		7,3		923	4,5	
$3/4Ti_4O_7 + 1/4C = Ti_3O_5 + 1/4CO$	820÷1100		1000÷1100		900÷1100	960÷1022		
						980		
Потеря массы исходных образцов, % Weight loss of initial samples, %		17,6	–	9,4	–	–	–	16,1



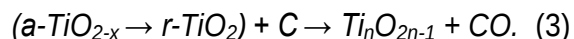
По окончании дегидратации оксидов титана и бора, плавление борного ангидрида B_2O_3 (тв.) $\rightarrow B_2O_3$ (ж.) происходит без акцентирования процесса заметным тепловым эффектом в температурном интервале $300\div 600^\circ\text{C}$. В этом же интервале начинается дегидратация и пиролиз сахарозы с окончанием при более высоких температурах $650\div 740^\circ\text{C}$. При этом максимальное развитие процесса пиролиза в ряду $He > Ar > \text{Вакуум} > \text{Воздух}$ сдвигается от 690 до 560°C , т.е. в атмосфере воздуха интенсивный период трансформации в углерод происходит при более низких температурах. Возможно, это связано с участием в процессе кислорода атмосферы, поскольку сопровождающий его экзотермический эффект имеет наибольшие параметры по протяженности $267\div 740^\circ\text{C}$ и величине $675,6$ Дж/г. Фактически процессы полимеризации/пиролиза сахарозы в компактном образце являются преобладающими в этот период и в первом приближении могут быть аналогом карбонизации связующего пека в составе углеграфитовых блоков.

Первый фазовый переход аморфного оксида титана к кристаллической анатазной форме $TiO_{2-x}F_x \rightarrow a-TiO_{2-x}$ не зависит от атмосферы в системе и происходит в основном при $700\div 850^\circ\text{C}$. Но самым важным является то, что эта анатазная форма оксида титана обнаруживает повышение стабильности в ряду атмосфер $He < Ar < \text{Вакуум} < \text{Воздух}$. В этом ряду максимальное развитие второго фазового перехода $a-TiO_{2-x} \rightarrow r-TiO_2$ сдвигается от 770°C до 890°C и продолжается более длительный период (см. табл. 3). Это означает, что наиболее предпочтительные условия для последовательного восстановления модифицированных оксидов титана в ряду $TiO_2 \rightarrow Ti_4O_7 \rightarrow Ti_3O_5 \rightarrow Ti_2O_3 \rightarrow TiO \rightarrow TiC$ реализуются при ведении процесса в атмосфере воздуха.

Подтверждением тому являются результаты рентгенофазового анализа образцов $TiO_2-B_2O_3-C$ после термического анализа в различных атмосферах (рис. 2). В каждом из экспериментов условия ТА да-

вали возможность реализации режимов нагрева, в которых фазообразование в процессе карботермического восстановления заканчивалось в ряду $a-TiO_2 \rightarrow Ti_4O_7 \rightarrow Ti_3O_5 \rightarrow \text{Rutile}$. Поэтому глубину или степень превращения условно оценивали по соотношению интенсивности пиков двух последних фаз – оксида Ti_3O_5 и рутила (R).

В соответствии со степенью превращения Ti_3O_5/R (рис. 2) полнота восстановления оксида титана в атмосфере аргона и динамическом вакууме возрастает в 1,5 раза, и более чем в 4 раза – в атмосфере воздуха (относительно атмосферы гелия). Другими словами, существенное превращение реализовано в результате нагрева исходной смеси в атмосфере воздуха в условиях взаимодействия пиролизного углерода с оксидом титана в период его наибольшей реакционной способности – перекристаллизации анатазной модификации в рутильную фазу в наиболее поздний и длительный температурный период:



Наоборот, температурный интервал ART (анатаз – рутил трансформация) процесса в гелии находится в низких пределах $710\div 820^\circ\text{C}$ и недостаточен для стимулирования последовательного восстановления $a-TiO_2 \rightarrow Ti_nO_{2n-1}$. Поэтому восстановление оксида титана начинается и частично происходит после ART при более высоких температурах $970\div 1100^\circ\text{C}$, которые создают термодинамические условия восстановления рутильной фазы $r-TiO_2$ до Ti_4O_7 .

С другой стороны, полученные результаты связаны не только с температурным периодом течения ART процесса, но и с дефицитом времени на восстановление оксида титана и, тем более, для дальнейшего взаимодействия титан- и борсодержащих компонентов до образования TiB_2 . В табл. 4 ниже произведен расчет периода нахождения образцов в зоне вероятного течения реакций восстановления от 900°C до температуры максимального нагрева с учетом нагрева и охлаждения.

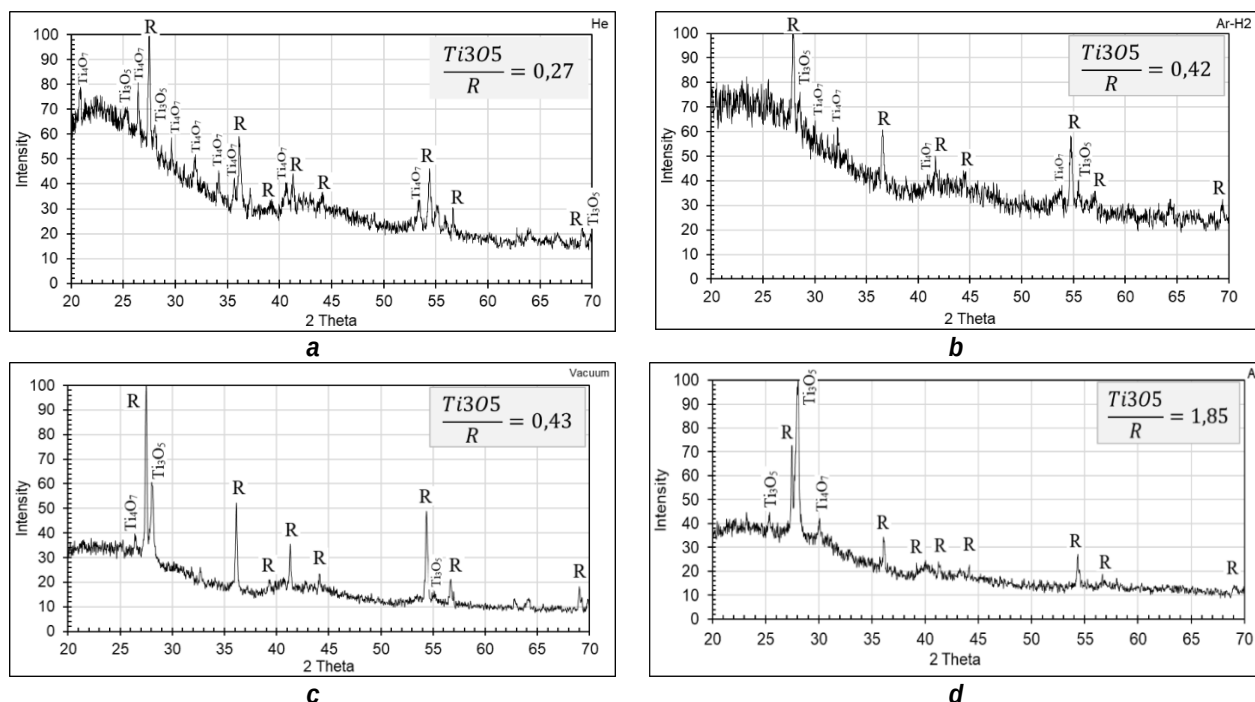


Рис. 2. Результаты РФА и степень восстановления оксида титана: а – гелий, нагрев до 1100°C; б – аргон, нагрев до 1100°C; в – вакуум, нагрев до 1100°C; д – воздух, нагрев до 1022°C
Fig. 2. XRF results and degree of titanium oxide reduction: a - helium heated up to 1100°C; b - argon heated up to 1100°C; c - vacuum heated up to 1100°C; d - air heated up to 1022°C

Очевидно, что периода взаимодействия от 12 до 110 минут недостаточно для осуществления карботермических процессов восстановления оксидов (рис. 3). Тем не менее, за наименьший период нахождения в зоне восстановительных процессов в атмосфере воздуха происходит появление наибольшего количества фаз Ti_4O_7 и Ti_3O_5 . Образование рутильной фазы происходит при недостатке углерода и/или продолжительности взаимодействия.

Полученные результаты еще раз подчеркивают преимущество ведения процесса восстановления оксидов титана при температурах ниже 1000°C в период фазовой ART трансформации. Об этом свидетельствует также внешний вид таблеток спрессованной реакционной смеси. Наибольшее изменение цвета, растрескивание и образование пор произошли с образцом после ТА в атмосфере воздуха.

Таблица 4

Период экспозиции смеси $TiO_2 - B_2O_3 - C$ в температурном интервале синтеза

Table 4

Exposure period of $TiO_2 - B_2O_3 - C$ mixture in the synthesis temperature range

Атмосфера / Atmosphere	Скорость нагрева/охлаждения, град./мин. / Rate of heating/cooling, degrees/min	Температурный интервал, °C / Temperature range, °C	Период выдержки, нагрев + охлаждение, мин. / Holding period, heating + cooling, min	$\frac{Ti_3O_5}{R}$, доли / fractions
Гелий / Helium	20	900–1100	10 + 10 = 20	0,27
Аргон / Argon + 2% H_2	20	900–1100	10 + 10 = 20	0,42
Вакуум (дин.) / Vacuum	2 / 20	900–1100	100 + 10 = 110	0,43
Воздух / Air	20	900–1022	6 + 6 = 12	1,85

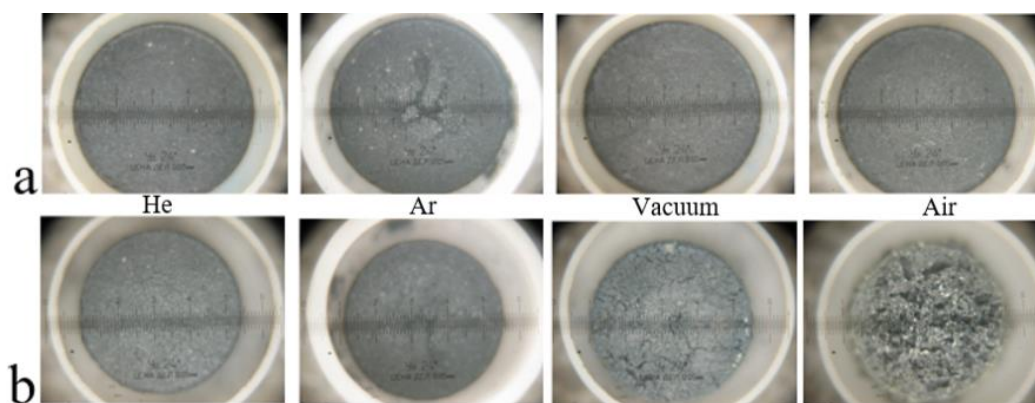


Рис. 3. Микрофотографии образцов до (а) и после (б) термического анализа
Fig. 3. Micrographs of samples before (a) and after (b) thermal analysis

Выводы

1. По результатам термического анализа образцов исходного реакционного состава в различных атмосферных условиях установлены температурные интервалы процессов дегидратации и трансформации компонентов смеси:

– плавление борного ангидрида B_2O_3 (тв.) $\rightarrow B_2O_3$ (ж.) происходит в температурном интервале $300 \div 600^\circ\text{C}$ без заметных тепловых эффектов;

– пиролиз сахарозы $C_{12}H_{22}O_{11} = 12C + 11H_2O \uparrow$ является преобладающим процессом в широком температурном интервале $350 \div 740^\circ\text{C}$;

– два этапа трансформации оксида титана происходят в интервале $650 \div 960^\circ\text{C}$:

1-й этап: $TiO_{2-x}F_x \rightarrow a-TiO_{2-x} + xF$ – Кристаллизация аморфной фазы в анатазную

2-й этап: $a-TiO_{2-x} \rightarrow r-TiO_2$ – Анатаз – рутил трансформация (ART)

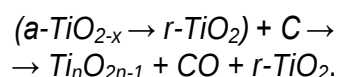
Кристаллизация аморфной фазы оксида титана заканчивается в этом интервале.

2. Анатазная форма оксида титана $a-TiO_2$ в составе реакционной смеси $TiO_2 - B_2O_3 - C$ повышает свою стабильность в ряду атмосфер $He < Ar < Вакуум < Воздух$ с максимальным развитием ART

(максимумы экзоэффектов) в этом ряду при температурах $770 < 820 < 840 < 890^\circ\text{C}$.

3. В атмосферах гелия, аргона и в вакууме ART происходит в температурном интервале $710 \div 900^\circ\text{C}$, недостаточном для восстановления оксида титана в обеих кристаллических формах.

4. В атмосфере воздуха ART достигает максимального развития при 890°C с проявлением небольшого экзотермического эффекта и продолжается до 960°C параллельно с процессом восстановления оксида титана по схеме:



Появление фаз Ti_4O_7 и Ti_3O_5 происходит за чрезвычайно короткий период (12 мин).

5. Установленные закономерности и особенности развития процессов дегидратации и трансформации компонентов смеси $TiO_2 - B_2O_3 - C$ необходимо учитывать и использовать в обеспечении низкотемпературного синтеза диборида титана.

Библиографический список

1. Кановская М. Сахар. Серия: Лекарство или яд. М.: АСТ, 2007. 159 с.
2. Позин М.Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей,

- окислов и кислот): в 2 т. Борный ангидрид, ч. 1; 4-е изд. Л.: Химия, 1974. 792 с.

3. Григоровская В.А., Шашкин Д.П., Западинский Б.И. О низкотемпературных превращениях ортобор-



ной кислоты // Химическая физика. 2009. Т. 28. № 8. С. 72–77.

4. Balci S. Boron oxide production kinetics using boric acid as raw material / S. Balci, N.A. Sezgi, E. Eren // Ind Eng Chem Res. 2012. Vol. 51. № 34. P. 11091–11096.
5. Derun, E. M. Characterization and Thermal Dehydration Kinetics of Highly Crystalline Mcallisterite, Synthesized at Low Temperatures / E.M. Derun and F.T. Senberber // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. 10 p.
6. Андрущенко В.П., Кашурин А.Н. Термический анализ сахаросодержащих сиропов // Известия ВУЗов. Пищевая технология. 1990. № 4. С. 89–91.
7. Sevim F., Demir F., Bilen M. and Okur H. Kinetic analysis of thermal decomposition of boric acid from thermogravimetric data // Korean Journal of Chemical Engineering. 2006. Vol. 23. № 5. P. 734–738.
8. Derun E.M., Kipcak A.S., Senberber F.T. and Yilmaz M.S. Characterization and thermal dehydration kinetics of admontite mineral hydrothermally synthesized from magnesium oxide and boric acid precursor // Research on Chemical Intermediates. 2015. Vol. 41. Issue 2. P. 853–866.
9. Rotaru A. Thermal and kinetic study of hexagonal boric acid versus triclinic boric acid in air flow // J. Therm. Anal. Calorim. 2016. Vol. 127. P. 755–63.

10. Nazarenko O.B., Bukhareva P.B., Melnikova T.V., Visakh P.M. Effect of Boric Acid on Volatile Products of Thermooxidative Degradation of Epoxy Polymers // Journal of Physics. Conference Series. 2016. Vol. 671. No. 1. 012041 p.
11. Aghili. S., Panjepour M., Meratian M. Kinetic analysis of formation of boron trioxide from thermal decomposition of boric acid under non-isothermal conditions // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017. P. 1–13.
12. Седнева Т.А., Локшин Э.П., Беляевский А.Т., Калинин В.Т. Зависимость фазовых переходов и фотокаталитической активности наноразмерного диоксида титана от допирования фторид-ионами // Перспективные материалы. 2007. № 6. С. 49–55.
13. Смирнова В.В. Божко П.В., Коновчук Т.В. Разработка технологии получения нанопористого сорбента на основе диоксида титана для очистки питьевой воды // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. (г. Томск, 9–13 апреля 2012 г). Томск, 2012. Т. 3. С. 393–394.
14. Горланов Е.С., Бажин В.Ю., Федоров С.Н. Низкотемпературное фазообразование в системе Ti-B-C-O // Цветные металлы. 2017. № 8. С. 76–81.

References

1. Kanovskaja M. *Sahar. Serija: Lekarstvo ili jad* [Sugar. Series: Medicine or Poison]. M.: AST Publ., 2007, 159 p. (In Russian).
2. Pozin M.E. *Tehnologija mineral'nyh solej (udobrenij, pesticidov, promyshlennyh solej, okislov i kislot). Bornyj angidrid* [Technology of mineral salts (fertilizers, pesticides, industrial salts, oxides and acids): in 2 volumes. Boric anhydride]. L.: Himija Publ., 1974. 792 p. (In Russian).
3. Grigorovskaja V.A., Shashkin D.P., Zapadinskij B.I. On low-temperature transformations of orthoboric acid. *Himicheskaja fizika* [Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics]. 2009, vol. 28, no. 8, pp. 72–77. (In Russian).
4. Balci S. Boron oxide production kinetics using boric acid as raw material / S. Balci, N.A. Sezgi, E. Eren // Ind Eng Chem Res. 2012, vol. 51, no. 34, p. 11091–11096.
5. Derun, E. M. Characterization and Thermal Dehydration Kinetics of Highly Crystalline Mcallisterite, Synthesized at Low Temperatures / E.M. Derun and F.T. Senberber // The Scientific World Journal. 2014, vol. 2014, 10 p.
6. Andrushhenko V.P., Kashurin A.N. Thermal analysis of sugar-containing syrups. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija* [News of Institutes of Higher Education]. 1990, no. 4, pp. 89–91. (In Russian).
7. Sevim F., Demir F., Bilen M. and Okur H. Kinetic analysis of thermal decomposition of boric acid from thermogravimetric data. Korean Journal of Chemical Engineering. 2006, vol. 23, no. 5, pp. 734–738.

8. Derun E.M., Kipcak A.S., Senberber F.T. and Yilmaz M.S. Characterization and thermal dehydration kinetics of admontite mineral hydrothermally synthesized from magnesium oxide and boric acid precursor. Research on Chemical Intermediates. 2015, vol. 41, pp. 853–866.
9. Rotaru A. Thermal and kinetic study of hexagonal boric acid versus triclinic boric acid in air flow. J. Therm. Anal. Calorim. 2016, vol. 127, pp. 755–63.
10. Nazarenko O.B., Bukhareva P.B., Melnikova T.V., Visakh P.M. Effect of Boric Acid on Volatile Products of Thermooxidative Degradation of Epoxy Polymers. Journal of Physics. Conference Series. 2016, vol. 671, no. 1, 012041 p.
11. Aghili. S., Panjepour M., Meratian M. Kinetic analysis of formation of boron trioxide from thermal decomposition of boric acid under non-isothermal conditions. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017, pp. 1–13.
12. Sedneva T.A., Lokshin Je.P., Beljaevskij A.T., Kalinnikov V.T. Dependence of phase transitions and photocatalytic activity of nano-sized titanium dioxide on doping with fluoride ions. *Perspektivnye materialy* [Promising materials]. 2007, no. 6, pp. 49–55. (In Russian).
13. Smirnova V.V. Bozhko P.V., Konovchuk T.V. *Razrabotka tehnologii poluchenija nanoporistogo sorbenta na osnove dioksida titana dlja ochistki pit'evoy vody* [Developing technology of nanoporous sorbent production based on titanium dioxide for drinking water purification]. Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-



prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh "Sovremennye tekhnika i tekhnologii" [Proceedings of XVIII International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Modern Engineering and Technology", Tomsk, 9–13 April 2012]. Tomsk, 2012, vol. 3, pp. 393–394. (In Russian).

14. Gorlanov E.S., Bazhin V.Ju., Fedorov S.N. Nizkotemperaturnoe fazoobrazovanie v sisteme Ti-B-C-O [Low-temperature phase formation in Ti-B-C-O system] // Cvetnye metally [Non-Ferrous Metals]. 2017, no. 8, pp. 76–81. (In Russian).

Критерии авторства

Горланов Е.С., Уголков В.Л. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Gorlanov E.S., Ugolkov V.L. 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 662.74.012:658.562

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-166-181>

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА КОКСА M_{25} , M_{10} , ПРИМЕНЯЕМЫХ НА КОКСОХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИИ

© А.Н. Смирнов¹, Д.И. Алексеев²

^{1,2}Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

Российская Федерация, 455036, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Анализ на адекватность существующих математических моделей для управления качеством кокса по параметрам M_{25} и M_{10} , исходя из их внутренней логики, теории и практики коксования. Выбор и обоснование модели, рекомендуемой авторами, для управления качеством кокса в доменном процессе. **МЕТОДЫ.** Для анализа моделей используется метод элементарных алгебраических преобразований для демонстрации линейности уравнения математической модели, сравнение принятых аксиоматических положений, принимаемых в моделях с теорией и практикой коксования, сопоставление прогнозирующих способностей математических моделей для установления их адекватности. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Установлена математическая общность между коэффициентами K_{opt} и $K_{opt}(V_t)$, ранее предлагавшимися разными авторами для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} . Предложены общие формулы для построения коэффициентов по типу K_{opt} и $K_{opt}(V_t)$. Приведены общие формулы для построения приведенных математических моделей, построенных на основе коэффициентов по типу K_{opt} и $K_{opt}(V_t)$. Проведено сравнение моделей, построенных на основе коэффициентов K_{opt} и $K_{opt}(V_t)$ с моделями, применяющимися на различных коксохимических предприятиях России. Рассмотрены прогнозирующие способности адаптивной и нейросетевой модели. Адаптивная модель в сравнении с другими имеет лучшую прогнозирующую способность. Нейросетевая модель имеет недостаточную точность прогнозирования качества кокса, исходя из верификации по ГОСТ 54250. **ВЫВОДЫ.** Адаптивная модель может быть рекомендована для применения по управлению качеством кокса по параметрам M_{25} и M_{10} в доменном процессе, однако с ее помощью невозможно проводить оптимизацию, направленную на снижение себестоимости кокса. Высказана нецелесообразность построения и использования моделей, построенных на основе коэффициентов K_{opt} и $K_{opt}(V_t)$. Перспективной с точки зрения управления качеством кокса по параметрам M_{25} и M_{10} и малоизученной, по мнению авторов, является модель, построенная на основе искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: показатели качества кокса, классификация по внутренней структуре и алгоритму построения, приведенная модель, адаптивная модель, нейросетевая модель, проблемы моделирования показателей качества кокса.

Информация о статье. Дата поступления 30 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 08 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Анализ математических моделей по управлению показателями качества кокса M_{25} , M_{10} , применяемых на коксохимических предприятиях России // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 164–179. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-166-181

ANALYSIS OF MATHEMATICAL CONTROL MODELS OF COKE QUALITY PARAMETERS M_{25} AND M_{10} APPLIED AT RUSSIAN METALLURGICAL COKE PRODUCTION ENTERPRISES

A.N. Smirnov, D.I. Alekseev

Nosov Magnitogorsk State Technical University,

38 Lenin pr., Magnitogorsk 455036, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to analyze the adequacy of existing mathematical models of coke quality control by M_{25} and M_{10} parameters based on both their internal logic and the theory and practice of coking; to select and justify the model recommended by the authors for coke quality control in the blast-furnace process. **METHODS.** The models are analyzed using the method of elementary algebraic transformations in order to demonstrate the linearity of

¹Смирнов Андрей Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физической химии и химической технологии, e-mail: sman@magtu.ru

Andrei N. Smirnov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Physical Chemistry and Chemical Technology, e-mail: sman@magtu.ru

²Алексеев Данил Игоревич, ассистент кафедры физической химии и химической технологии, e-mail: alekseev41047@mail.ru

Danil I. Alekseev, Assistant Professor of the Department of Physical Chemistry and Chemical Technology, e-mail: alekseev41047@mail.ru



the mathematical model equation, compare accepted axiomatic positions adopted in the models with the theory and practice of coking, and compare the predictive capabilities of the mathematical models for their adequacy recognition.

RESULTS AND THEIR DISCUSSION. A mathematical generality has been determined between the coefficients K_{opt} and $K_{opt}(V_t)$, which were previously proposed by different authors for predicting coke quality parameters M_{25} and M_{10} . General formulas have been proposed for constructing the coefficients of K_{opt} and $K_{opt}(V_t)$ type. General formulas have been given for constructing the reduced mathematical models built on the basis of K_{opt} and $K_{opt}(V_t)$ type coefficients. The models built on the basis of K_{opt} and $K_{opt}(V_t)$ coefficients have been compared with the models used at various coke-chemical enterprises of Russia. Consideration is given to the predictive abilities of adaptive and neural network models. The adaptive model has a better predicting capacity as compared with other models. The neural network model has insufficient forecast precision of coke quality based on GOST 54250 verification. **CONCLUSIONS.** It is recommended to use an adaptive model to control coke quality by M_{25} and M_{10} parameters in a blast-furnace process but it is useless for the optimization aimed at reducing the cost of coke. The inexpediency of construction and use of the models based on the coefficients K_{opt} and $K_{opt}(V_t)$ is expressed. The authors suppose that the model built on the basis of artificial neural networks is promising in terms of coke quality control by M_{25} and M_{10} parameters but it is poorly studied.

Keywords: coke quality parameters, classification by internal structure and construction algorithm, reduced model, adaptive model, neural-network model, problems of coke quality parameter modeling

Article info. Received November 30, 2017; accepted February 08, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Smirnov A.N., Alekseev D.I. Analysis of mathematical control models of coke quality parameters M_{25} and M_{10} applied at Russian metallurgical coke production enterprises. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 164–179. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-166-181

Введение

Кокс является важной составляющей доменного процесса. Экономические показатели работы доменной печи, такие как производительность и расход кокса на тонну выплавляемого чугуна напрямую зависят от качества кокса. Расход кокса в доменной плавке в настоящее время составляет 420–440 кг на 1 т производимого чугуна [1–2].

Кокс в доменном процессе выполняет функции восстановителя (источник углерода) и является как источником тепла при взаимодействии с дутьем, подаваемым в доменную печь, так и каркасом («разрыхлителем») столба шихты доменной печи для обеспечения равномерной по всему объему газопроницаемости дутья. Первые две функции может выполнять любое углеродсодержащее топливо. Так, например, при организации доменного процесса с технологией вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) источником тепла и углерода в доменном процессе является угольная пыль, однако кокс все равно необходим, так как без него невозможно обеспечить газопроницаемость столба загрузки доменной печи. Газопроницаемость столба обеспечивается за счет того, что крупные куски кокса в шихтовой загрузке доменной печи образуют пустоты, через которые и проникает газовое дутье. Для того чтобы кокс физически не разрушался при падении в доменную печь при ее загрузке, выдерживал массу столба шихты в доменной печи и не истирался в процессе прохождения шихты сверху вниз от колошника к горну, он должен обладать определенной механической прочностью и малой истираемостью, которые характеризуют качество кокса.

Количественная оценка кокса на прочность (дробимость и истираемость) проводится с помощью его испытания по ГОСТ 5953 «Кокс с размером кусков 20 мм и более» (ИСО 556-80). Суть методики состоит во вращении массы пробы кокса в барабане с полками, имитируя падение, с последующим рассевом пробы на классы менее 10 и более 25 мм. Отношение массы пробы класса более 25 мм к исходной массе до испытания, выраженное в процентах, будет показателем дробимости M_{25} ; аналогичное отношение для класса менее 10 мм определяет его истираемость M_{10} .

Существуют зарубежные показатели качества кокса, такие как CSR (прочность кокса после реакции) и CRI (реакционная способность кокса), на которые появился относительно недавно ГОСТ 54250 (ИСО 18894:2006) [3–5]. Основное отличие данной методики от определения показателей M_{25} и M_{10} в более адекватном физическом моделировании условий пребы-



вания кокса в доменной печи. Прочность кокса по дробимости CSR определяется аналогично M_{25} , но только после проведения реакции взаимодействия с CO_2 (реакция Будуара) при температуре 1100 °С. Опыт определения показателей CSR и CRI на коксохимических предприятиях (КХП) России демонстрирует их низкую воспроизводимость. Помимо этого, проведение анализа качества кокса по показателям CSR и CRI более длительно и трудоемко, выше по стоимости, чем определение показателей M_{25} и M_{10} [6]. Поэтому в оперативной работе КХП и доменного производства используются именно показатели M_{25} и M_{10} , которые, как правило, определяются четыре раза в смену, а CSR и CRI – один, два раза в месяц.

Высококачественным считается кокс, который имеет большое значение M_{25} и малое M_{10} [1]. При использовании высококачественного кокса его расход в доменной плавке снижается, а производительность доменной печи возрастает.

Помимо прочностных свойств качество кокса характеризуется также содержанием серы, фосфора и золы. Зола кокса является балластом в доменном процессе, а сера и фосфор, переходя из чугуна в сталь, придают стали, соответственно, красноломкость и хладноломкость, снижая ее потребительские свойства. Зола кокса, которая, преимущественно, состоит из SiO_2 и Al_2O_3 , может быть учтена в материальном балансе доменного процесса. Единственное для подобной поправки условие – стабильность кокса по содержанию золы. Наличие химических соединений серы и фосфора в коксе обусловлено содержанием данных элементов в исходном угле для коксования. Содержание серы и фосфора не может быть специально снижено каким-либо способом, кроме смены сырьевой угольной базы, что, зачастую, для КХП невозможно сделать. Косвенно, используя высококачественный кокс, снижается его расход (вносимая масса) в доменной плавке, и, соответственно, внесение «вредных» для чугуна и стали элементов серы, фосфора, а также балластной золы.

В настоящее время затраты на производство высококачественного кокса при условии отсутствия технологии вдувания ПУТ не окупаются в доменном процессе. Изготавливаемый в настоящее время кокс на российских КХП оценивается как среднекачественный. Поскольку кокс используется среднекачественный, то для доменного производства для рациональной подачи шихтовых компонентов в доменную печь важно знать текущие числовые значения параметров M_{25} и M_{10} . Однако из-за большого объема производства, зачастую, когда результаты испытания кокса на показатели M_{25} и M_{10} определены, кокс уже находится в доменной печи. Поэтому встает вопрос о прогнозировании показателей качества кокса по параметрам M_{25} и M_{10} .

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных моделированию и прогнозированию показателей качества кокса для различных коксохимических предприятий. Зачастую достаточно сложно выбрать для моделирования и исследования ту или иную модель, ведь каждая из них, на первый взгляд, пригодна для этого. Однако на практике авторы большинства работ мало уделяют внимания проблеме проверки своих математических моделей на адекватность с точки зрения непротиворечия уже имеющимся представлениям по теории коксования и другим математическим моделям. В данной статье рассмотрены и проанализированы математические модели, относящиеся к приведенному, адаптивному и нейросетевому типу [7].

Анализ математических моделей на основе структуры и алгоритма их построения

В классификации по внутренней структуре и алгоритму построения [7] основной особенностью приведенных моделей является общий вид математического выражения. В связи с этим, рассмотрение приведенных моделей сводится к анализу общего вида математического выражения. К данному типу относятся модели, изложенные в работах [8–11].



Адаптивная модель – это, по сути, алгоритм для обработки и прогнозирования временных рядов. Нейронные сети – еще более сложный алгоритм, для его анализа необходима исчерпывающая информация об обоснованности выбранной архитектуры сети, нахождения ее коэффициентов. Прогнозирующие способности и основные недостатки адаптивной и нейросетевой моделей рассмотрены в работах [12, 13].

Анализ приведенных математических моделей

Базовой среди моделей структурного типа является модель, изложенная в работе [8]. Расчетная формула показателя качества кокса M_{25} для коксового цеха № 3 с сухим тушением кокса коксохимического предприятия Нижнетагильского металлургического комбината в данной модели передается совокупностью уравнений [8]:

$$M_{25} = 0,0541 * K_{opt} + 84,072, \quad (1)$$

где K_{opt} – коэффициент оптимальности.

$$K_{opt} = 100 * (K_C * K_K * K_{Ж}), \quad (2)$$

где K_C – коэффициент оптимальности соотношения (содержания) спекающих и отошающих компонентов; K_K – коэффициент оптимальности содержания в шихте коксовых углей; $K_{Ж}$ – коэффициент оптимальности содержания в шихте жирных углей.

$$K_C = \frac{100 - (\Sigma CK - 43) * 2}{100}, \quad (3)$$

где ΣCK – сумма спекающих компонентов в шихте, %.

$$K_K = \frac{100 - (\Sigma K - 37)}{100}, \quad (4)$$

где ΣK – доля содержания в шихте коксовых углей, %.

$$K_{Ж} = \frac{100 - (\Sigma Ж - 23)}{100}, \quad (5)$$

где $\Sigma Ж$ – доля содержания в шихте жирных углей, %.

Согласно работе [8], «... при делении шихты на спекающие и отошающие компоненты оптимизация ее состава производится по: их соотношению, %, 43:57 (средние); содержанию коксовых углей (37%) в отошающих компонентах; содержанию углей марки Ж (23%) в спекающей части...». Данное утверждение означает, что если показатели шихты имеют оптимальные значения $\Sigma CK = 43$, $\Sigma K = 37$, $\Sigma Ж = 23$, то, как следует из формул (1)–(5), $K_{opt} = 100\%$ и, как пытаются заложить в свою модель авторы, получается кокс максимального качества по M_{40} и M_{25} (рис. 1 в [8]), числовые значения которых составляют для Нижнетагильского металлургического комбината 76,7 и 89,5% (сухое тушение) [8].

Проанализируем данную модель и относящиеся к ней математические выражения (1)–(5). В совокупности уравнений (1)–(5) принято низкое оптимальное значение $\Sigma CK = 43\%$.



В [8], при перечислении оптимальных значений параметров шихты, полученных в результате практики коксования в масштабах бывшего СССР, приводится оптимальное значение для витринита $Vt > 60\%$, хотя Vt и ΣCK соотносятся следующим образом:

$$\Sigma CK = Vt + L + \frac{1}{3}Sv,$$

где L – сумма липтинита, %; Sv – сумма семивитринита, %.

Если $Vt > 60\%$, то и $\Sigma CK > 60$, но никак не $\Sigma CK = 43\%$. Таким образом, в работе [8] фактически приведено два несогласующихся между собой оптимума $\Sigma CK > 60$ и $\Sigma CK = 43\%$, один из которых ($\Sigma CK = 43\%$) принимается за «истинный» и используется в модели, хотя общепризнанным оптимумом все-таки считается $\Sigma CK > 60$ [1, 2].

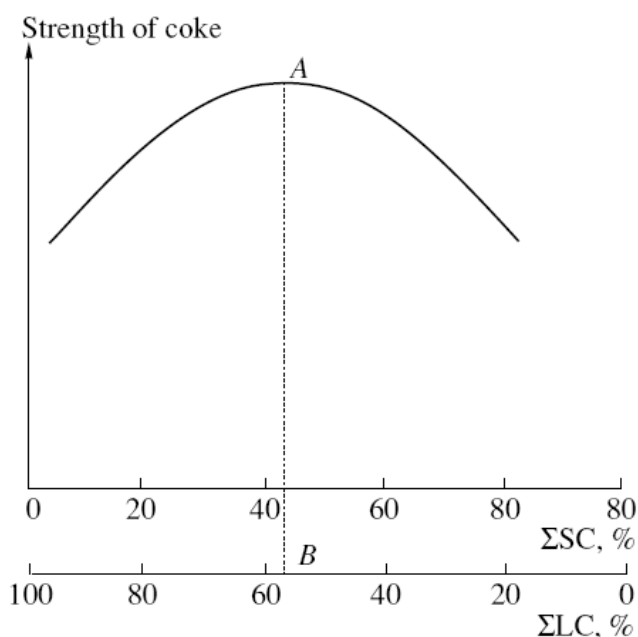


Рис. 1. Зависимость механической прочности кокса от спекающих (ΣCK или ΣSC) и отощающих (ΣOK или ΣLC) компонентов в угольной шихте

Fig. 1. Dependence of mechanical strength of coke on sintering (ΣCK or ΣSC) and lean (ΣOK or ΣLC) components in coal charge

Анализ выражений (3)–(5) показывает, что значение параметра M_{25} при оптимуме $K_{opt} = 100\%$ не является максимальным, так как возможно значение $K_{opt} > 100\%$. Например, для частных коэффициентов оптимальности можно записать:

$$K_C > 1, K_C = \frac{100 - (\Sigma CK - 43) \cdot 2}{100} > 1, \Sigma CK < 43; \quad (6)$$

$$K_K > 1, K_K = \frac{100 - (\Sigma K - 37)}{100} > 1, \Sigma K < 37; \quad (7)$$

$$K_{\mathcal{K}} > 1, K_{\mathcal{K}} = \frac{100 - (\Sigma \mathcal{K} - 23)}{100} > 1, \Sigma \mathcal{K} < 23. \quad (8)$$



При выполнении условий (6)–(8):

$$K_{opt} > 100\% . \quad (9)$$

Будем определять значение M_{25} при следующих параметрах шихты:

$$\Sigma CK = 43, \Sigma K = 30, \Sigma Ж = 23 . \quad (10)$$

Рассчитаем K_{opt} (9), с учетом формул (3)–(5) и значений параметров шихты (10):

$$K_C = \frac{100 - (43 - 43) * 2}{100} = 1 ;$$

$$K_K = \frac{100 - (30 - 37)}{100} = 1,07 ;$$

$$K_{Ж} = \frac{100 - (23 - 23)}{100} = 1 ;$$

$$K_{opt} = 100 * (1 * 1,07 * 1) = 107\% .$$

По формуле (1) находим M_{25} :

$$M_{25} = 0,0541 * 107 + 84,072 = 89,9\% . \quad (11)$$

Таким образом, приводимое «оптимальное» значение для M_{25} в 89,5% не является максимальным³ (сравнить со значением из (11)).

Идея введения коэффициента по аналогии с K_{opt} , который бы отражал отклонение от оптимальности, например, по показателям шихты, пусть даже для данного производства, является достаточно привлекательной ввиду простоты конструкции модели (см. формулы (1)–(5)), но, как будет показано ниже, не лишена противоречий.

Можно показать, что коэффициент, построенный по принципу модели [8] является линейным по каждому своему входному параметру. Для случая многих независимых переменных коэффициент оптимальности K'_{opt} будет выглядеть следующим образом:

$$K'_{opt} = 100 * \prod_{i=1}^N K_i ; \quad (12)$$

$$K_i = \frac{100 - (x_i - a_i)}{100} , \quad (13)$$

³Данные значения параметров шихты были взяты с учетом физического смысла модели [8] и производственной действительности. Если абстрагироваться от значений параметров шихты, используемых на сегодняшний день в производстве, то можно получить большее расхождение между «оптимальным» и максимальным значением параметра M_{25} в (11).



где N – количество независимых переменных; x_i – i -я независимая переменная, характеризующая шихту для коксования; a_i – i -е оптимальное значение параметра x_i ; K_i – i -й частный коэффициент оптимальности для x_i -го параметра.

Пусть:

$$\prod_{i=1, i \neq j}^N K_i = \text{const} . \quad (14)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} K'_{opt} = 100 * \prod_{i=1}^N K_i &= 100 * \frac{100 - (x_j - a_j)}{100} * \prod_{i=1, i \neq j}^N K_i = 100 * \prod_{i=1, i \neq j}^N K_i - \\ &- (x_j - a_j) * \prod_{i=1, i \neq j}^N K_i = 100 * \prod_{i=1, i \neq j}^N K_i + a_j * \prod_{i=1, i \neq j}^N K_i - x_j * \prod_{i=1, i \neq j}^N K_i \end{aligned} \quad (15)$$

Если принять:

$$A = - \prod_{i=1, i \neq j}^N K_i ; \quad (16)$$

$$B = \prod_{i=1, i \neq j}^N K_i * (100 + a_j) . \quad (17)$$

То получаем:

$$K'_{opt} = A * x_j + B . \quad (18)$$

Далее, если строить линейную зависимость, например, по аналогии с (1), между коэффициентом K'_{opt} по формуле (12) и каким-либо показателем качества кокса, то итоговое уравнение также получится линейным:

$$\begin{aligned} \text{Прочность Кокса} &= C * K'_{opt} + D = C * (A * x_j + B) + D = \\ &= C * A * x_j + (C * B + D) . \end{aligned} \quad (19)$$

Принимаем обозначения:

$$k = C * A, b = C * B + D . \quad (20)$$

Получаем:

$$\text{Прочность Кокса} = k * x_j + b . \quad (21)$$

Однако, как показали те же модели [14–17], любая независимая переменная, например, CK , R_o , y входит в итоговое уравнение нелинейно. Явную нелинейность между параметрами CK и «прочностью кокса» демонстрирует зависимость (квадратичная), представленная на рис. 1 [8], которая не соответствует линейному виду (1), (15)–(21). Фактически, используя знание о нелинейности зависимости между прочностью кокса и CK , авторы модели [8] строят уравнение (1), которое, тем не менее, является линейным между CK и показателем



M_{25} . Это явное противоречие в модели [8], поэтому с формальной математической точки зрения авторам не удалось заложить свои идеи в модель⁴.

Рассмотрим работы авторов, которые пошли по пути создания своих математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса аналогично изложенному в [8]. В работе [18] производится проверка и подтверждение состоятельности параметра K_{opt} и модели по типу (1) для заводов Украины по данным за 2004–2006 гг. В этой работе (рис. 2), приводятся линейные зависимости для M_{25} и M_{10} от K_{opt} , пересчитанные для украинских коксохимических предприятий, с квадратами коэффициентов корреляции: $R^2 = 0,6506$ ($R = 0,8066$) и $R^2 = 0,6064$ ($R = 0,7787$) соответственно. Такие значения коэффициентов корреляции демонстрируют тесную линейную связь между прочностными свойствами кокса и коэффициентом оптимальности K_{opt} , что, как показано выше, означает линейность зависимости между M_{25} и M_{10} и независимыми параметрами, например, шихтовыми, что противоречит теоретическим предпосылкам самой работы [8] (рис. 1), моделям [14–18], аналогичной [18], а также по своему содержанию работам [10, 11].

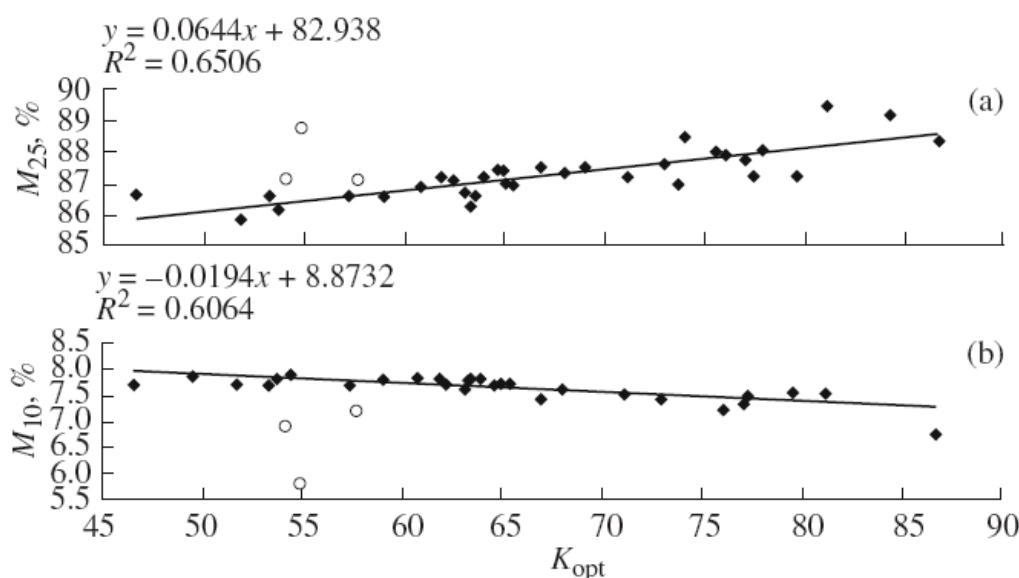


Рис. 2. Линейные зависимости для M_{25} и M_{10} от K_{opt} : а – корреляция для M_{25} ; б – корреляция для M_{10}

Fig. 2. Linear dependences of M_{25} and M_{10} on K_{opt} : а – correlation for M_{25} ; б – correlation for M_{10}

В работе [10] авторы, также осуществляя проверку пригодности параметра K_{opt} , предложенного в [8], для моделирования показателя M_{25} для коксохимических заводов Украины по данным за 2010–2011 гг. приводят не линейную, а квадратичную зависимость для M_{25} и K_{opt} и коэффициент корреляции составляет всего $R = 0,5$. В этой же работе предлагается, по сути аналогичный K_{opt} , коэффициент $K_{opt(Vt)}$, построенный по типу (12). Приведем расчетные

⁴Максимум для линейной функции достигается на одном из концов отрезка независимого параметра. Поэтому в соотношениях (9)–(21), расширив область значений параметра K_{opt} , нам удалось «сдвинуть» точку максимума для M_{25} . Если бы зависимость между K_{opt} и «прочностью кокса» была бы квадратичной, как показано на рис. 1 [8], а оптимум для прочности кокса достигался бы при значении $K_{opt} = 100\%$, то изменить максимальное значение для прочности кокса было бы нельзя.



формулы для $K_{opt(Vt)}$, чтобы наглядно убедиться в аналогичности с видом формул (12) и (13) [11]:

$$K_{opt(Vt)} = 100 * (K_{\Gamma} * K_{Ж} * K_K * K_{OC}), \quad (22)$$

где $K_{opt(Vt)}$ – коэффициент оптимальности; K_{Γ} – коэффициент оптимальности содержания составляющих витринита 0,65–0,89%, соответствующих марке Г; $K_{Ж}$ – коэффициент оптимальности содержания составляющих витринита с величиной показателя отражения 0,90–1,19%, то есть соответствующих марке Ж; K_K – коэффициент оптимальности содержания составляющих витринита с величиной показателя отражения 1,20–1,39%, то есть соответствующих марке К; K_{OC} – коэффициент оптимальности содержания составляющих витринита с величиной показателя отражения 1,40–1,69%, соответствующих марке ОС.

$$K_{\Gamma} = \frac{100 - (\Sigma Vt_{R0=0,65-0,89} - 65)}{100}. \quad (23)$$

$$K_{Ж} = \frac{100 - (\Sigma Vt_{R0=0,90-1,19} - 65)}{100}. \quad (24)$$

$$K_K = \frac{100 - (\Sigma Vt_{R0=1,20-1,39} - 14)}{100}. \quad (25)$$

$$K_{OC} = \frac{100 - (\Sigma Vt_{R0=1,40-1,69} - 7)}{100}. \quad (26)$$

Таким образом, выводы, сделанные относительно коэффициента оптимальности K_{opt} и его связи с прочностью кокса и независимыми параметрами, будут справедливы и для $K_{opt(Vt)}$.

Те же авторы [10] в работе [11] осуществляют проверку модели [8] на основе K_{opt} по данным заводов Украины, но уже за 2010–2012 гг.: для квадратичной зависимости между M_{25} , M_{10} и K_{opt} коэффициент корреляции составил $R = 0,28$ и $R = 0,38$ соответственно. В [11] для предлагаемого в [10] коэффициента $K_{opt(Vt)}$ по данным КХП «АрселорМиттал Кривой Рог» получена зависимость между M_{25} и $K_{opt(Vt)}$ с коэффициентом корреляции $R = 0,64$:

$$M_{25} = -0,0009 * K_{opt(Vt)}^2 + 0,1933 * K_{opt(Vt)} + 77,177. \quad (27)$$

В [11] авторы оставляют открытым вопрос о моделировании показателей качества кокса. На наш взгляд, это подчеркивает неудовлетворенность полученными результатами, в частности достаточно низким коэффициентом корреляции для выражения (27), что соответствует низкой прогнозирующей способности.

Простота аналитического вида для частного и общего коэффициентов оптимальности, таких как (2)–(5), (22)–(26) по типу (12), (13), требует введения нелинейности в уравнение для моделирования показателей качества кокса, что доказывают рис. 3–7 (рис. 1–7 из работ [10] и [11]) соответственно. Причем эта нелинейность значительная, о чем свидетельствуют слабые



корреляции для квадратичных зависимостей между показателями качества кокса и каким-либо коэффициентом оптимальности ((2) или (22)), что соответствует низкой прогнозирующей способности модели.

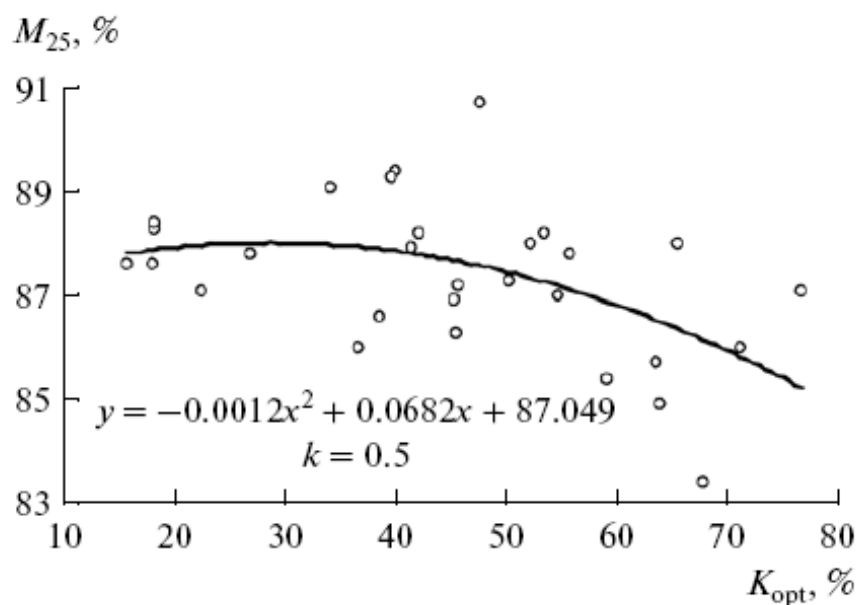


Рис. 3. Нелинейная зависимость для M_{25} от K_{opt} по данным работы украинских коксохимических производств за 2010–2011 гг

Fig. 3. Nonlinear dependence of M_{25} on K_{opt} by the operation data of Ukrainian coke-plants for the period from 2010 to 2011

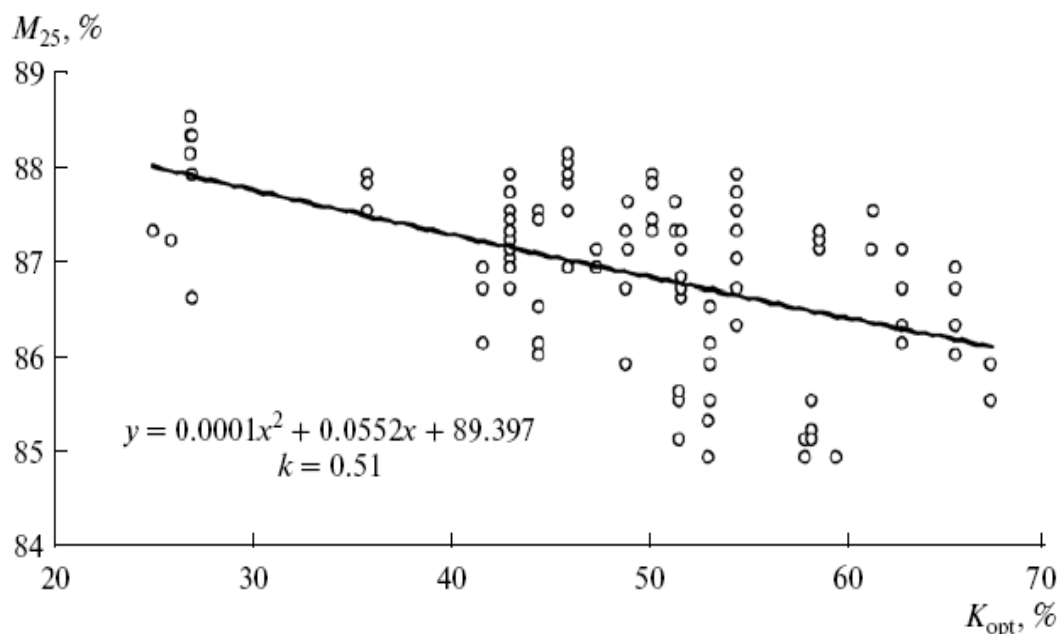


Рис. 4. Линейная зависимость для M_{25} от K_{opt} по данным работы украинских коксохимических производств за 2010–2011 гг.

Fig. 4. Linear dependence of M_{25} on K_{opt} by the operation data of Ukrainian coke-plants for the period from 2010 to 2011

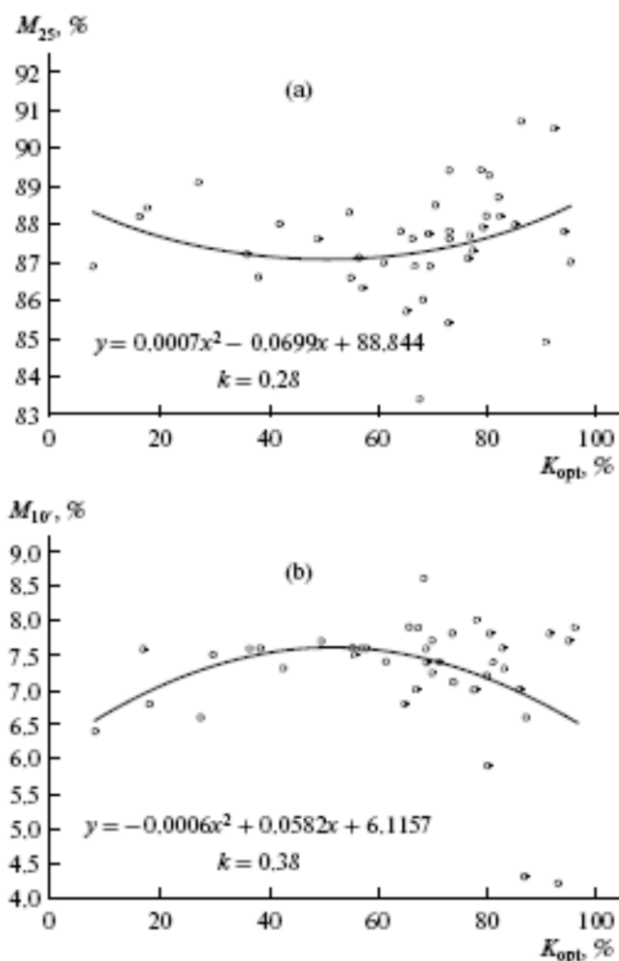


Рис. 5. Нелинейные зависимости для M_{25} и M_{10} от K_{opt} по данным работы украинских коксохимических производств за 2010–2012 гг:

а – корреляция для M_{25} ; б – корреляция для M_{10}

Fig. 5. Nonlinear dependences of M_{25} and M_{10} on K_{opt} by the operation data of Ukrainian coke-plants for the period from 2010 to 2012: а – correlation for M_{25} ; б – correlation for M_{10}

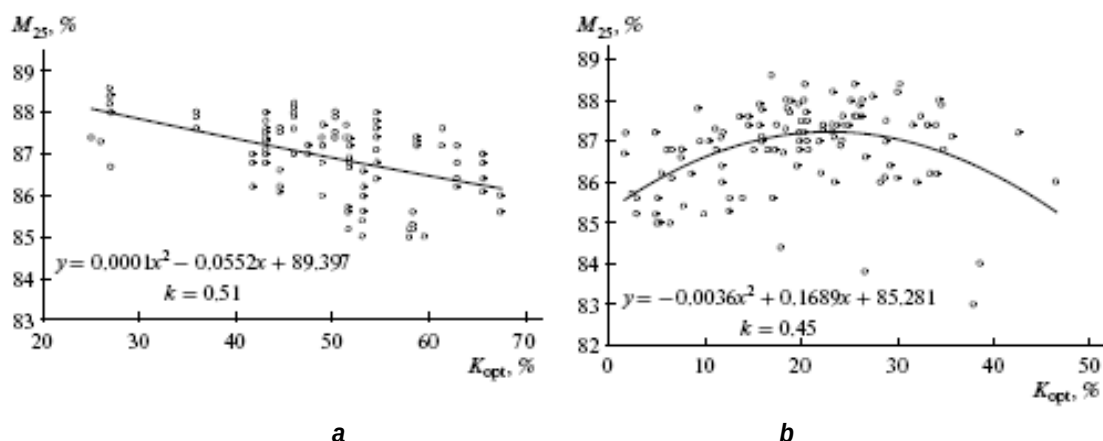


Рис. 6. Линейная и нелинейная зависимости для M_{25} от K_{opt} по данным работы КХП «АрселорМиттал Кривой Рог» за 2010–2012 гг: а – линейная корреляция для M_{25} ; б – нелинейная корреляция для M_{25}

Fig. 6. Linear and nonlinear dependences of M_{25} on K_{opt} by the operation data of PAO "Arcelor Mittal Krivoy Rog" for the period from 2010 to 2012: а – linear correlation for M_{25} ; б – nonlinear correlation for M_{10}

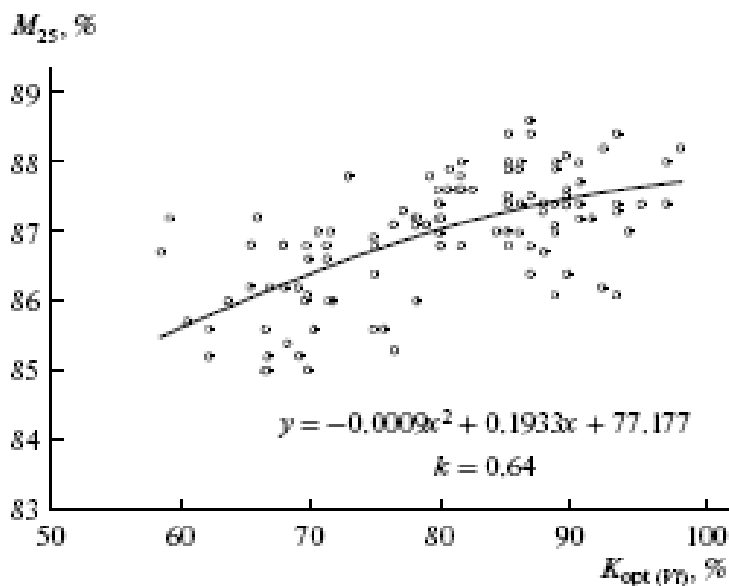


Рис. 7. Нелинейная зависимость для M_{25} от $K_{opt(Vt)}$ по данным работы

КХП «АрселорМиттал Кривой Рог» за 2010–2012 гг

Fig. 7. Nonlinear dependence of M_{25} on $K_{opt(Vt)}$ by the operation data of PAO "Arcelor Mittal Krivoi Rog" for the period from 2010 to 2012

В связи с вышеизложенным, полагаем, что математические модели для прогнозирования показателей качества кокса наподобие работ [10–11] на основе общих и частных коэффициентов оптимальности по типу (12) и (13), сложны для построения, практического использования, и их дальнейшая разработка нецелесообразна.

Рассмотрение прогнозирующей способности и основных недостатков адаптивной и нейросетевой моделей

Адаптивная модель описана в работе [12] и создавалась на основе данных КХП ЗСМК. Прогнозирующая способность [20] для лучшего варианта данной адаптивной модели приведена в таблице [12].

Прогнозирующая способность адаптивной модели Predicting power of the adaptive model

Показатель качества кокса Coke quality parameter	Прогноз на сутки Daily forecast		
	1	2	3
M_{40}	$\frac{0,77}{1,20}$	$\frac{1,24}{1,38}$	$\frac{1,29}{1,53}$
M_{10}	$\frac{0,12}{0,14}$	$\frac{0,14}{0,16}$	$\frac{0,15}{0,17}$

Примечание. В числителе указана наименьшая абсолютная разница между прогнозируемым значением и полученным в результате коксования; в знаменателе – наибольшая абсолютная разница.

Note. The numerator indicates the smallest absolute difference between the predicted value and the value obtained as a result of coking; the denominator indicates the greatest absolute difference.

Из таблицы видно, что адаптивная модель обладает высокой прогнозирующей способностью. По данным из работы [12], а также анализу интервала попадания ошибки прогнози-



вания различных структурных моделей [7, 14–18], получается, что прогнозирующая способность адаптивной модели выше, чем какой-либо структурной. Данная модель может быть рекомендована для управления качеством при проведении доменного процесса.

Основным недостатком данной адаптивной модели [12] является невозможность проведения оптимизации, что следует из структуры самого алгоритма. К недостаткам также можно отнести большое количество настраиваемых коэффициентов, что является следствием сложности алгоритма: коэффициенты алгоритмов сглаживания α_i , β_i при выделении опорных составляющих $Z^*(i)$ и $Y^*(i)$ коэффициенты α_{ϑ} , β_{ϑ} , a_b алгоритма экстраполяции приведенных выходных воздействий; коэффициенты k_{ij} для расчета приращений $\Delta Y_j(i)$ по средствам $\Delta Z_j(i)$.

Новым подходом к проблеме прогнозирования показателей качества кокса является модель [13], построенная по нейросетевому типу. В качестве моделируемых показателей качества кокса авторы [13] использовали показатели реакционной способности (CRI) и прочности кокса после реакции (CSR). В результате построения нейронной сети путем написания соответствующей компьютерной программы, основанной на параметрах V_t , OK , A^d , V^{daf} , ПК (пористость), I_B (объемная доля инертинита); R_o , W^a , состоящей из 3 скрытых слоев по 15 нейронов в каждом, и обучении ее в течение 24 часов была достигнута средняя относительная ошибка прогноза показателей CRI и CSR в 9 и 7% соответственно. О применении на каком-либо коксохимическом предприятии данной модели-программы неизвестно. Отметим огромное время для построения модели [13] – 24 часа и значительную относительную ошибку прогноза значений CRI и CSR. Покажем существенность ошибки прогнозирования модели [13] на основе сопоставления с допустимыми расхождениями в параллелях по ГОСТ 54250.

Высококачественный кокс соответствует CSR на уровне 60%, а CRI – 30%. Отечественные КХП выпускают среднекачественный кокс с показателями CSR менее 60% и CRI более 30%. Если значение показателя CRI находится в пределах 30–40%, то допустимое расхождение в параллелях составляет $\Delta = 3,0\%$ абсолютных (для интервала 40–60% – $\Delta = 3,5\%$ абсолютных). Для CSR в диапазоне 50–60% отклонение в параллелях – $\Delta = 3,0\%$ абсолютных (менее 50% – $\Delta = 3,5\%$ абсолютных). Оценим возможные варианты и значения относительных ошибок по ГОСТ 54250.

Для CRI (по модели [13] $\delta_{CRI} = 9\%$):

$$\delta_{CRI} = \frac{\Delta}{\text{ИстинноеЗначениеCRI}} * 100 = \frac{3,0}{30} * 100 = 10\%; \quad (28)$$

$$\delta_{CRI} = \frac{\Delta}{\text{ИстинноеЗначениеCRI}} * 100 = \frac{3,0}{40} * 100 = 7,5\%; \quad (29)$$

$$\delta_{CRI} = \frac{\Delta}{\text{ИстинноеЗначениеCRI}} * 100 = \frac{3,5}{50} * 100 = 7\%. \quad (30).$$

Для CSR (по модели [13] $\delta_{CSR} = 7\%$):

$$\delta_{CSR} = \frac{\Delta}{\text{ИстинноеЗначениеCSR}} * 100 = \frac{3,0}{60} * 100 = 5\%; \quad (31)$$



$$\delta_{CSR} = \frac{\Delta}{\text{ИстинноеЗначениеCSR}} * 100 = \frac{3,0}{50} * 100 = 6\% ; \quad (32)$$

$$\delta_{CSR} = \frac{\Delta}{\text{ИстинноеЗначениеCSR}} * 100 = \frac{3,5}{40} * 100 = 8,75\% . \quad (33)$$

Из оценочных выражений (28)–(33) видно, что точности модели [13] недостаточно для адекватного прогнозирования показателей CSR и CRI. Формальный подход применения нейронных сетей, когда не используется априорная информация о происходящем процессе, приводит к увеличению вычислительного процесса. При этом (в идеале) алгоритм должен был бы не просто описать вход/выход одним из многочисленных способов, а определить параметры, которые в большей степени влияют на качество кокса и приписать им большие коэффициенты в уравнении нейронной сети для параметров с меньшим количеством влияния – меньшие. Если это условие не выполняется, то результаты прогнозирования на новой выборке будут неудовлетворительными.

Выводы

В статье были рассмотрены существующие математические модели для прогнозирования и управления качеством кокса по показателям M_{25} и M_{10} [8–19].

Для моделей [8–11] показана общность аналитического строения, формализована методика их построения, которая проанализирована на предмет соответствия теории и практики коксования, непротиворечия между закладываемыми концепциями и математическим описанием. Анализ данных работы [8] позволил выявить несоответствия между закладываемым физическим смыслом и видом математического выражения. Высказана нецелесообразность построения математических моделей по типу [8–11].

Модель [12], построенная по адаптивному типу [7], имеет высокую прогнозирующую способность и может быть рекомендована для оперативного управления качеством кокса при проведении доменного процесса. Однако данная модель не пригодна для проведения оптимизации и снижения себестоимости производимого кокса в силу особенности своего алгоритма построения и математического вида.

Новой в теоретическом и практическом плане является модель [13], которая реализована в виде специально созданной программы, написанной на одном из объектно-ориентированных языков программирования и на основе искусственных нейронных сетей. Относительная ошибка прогноза показателей качества кокса по параметрам CSR, CRI по модели [13] составила 9 и 7%, соответственно, что при адекватном пересчете превышает допустимые расхождения в параллелях по ГОСТ 54250. Несмотря на это, подход к построению математических моделей на основе нейронных сетей, по нашему мнению, является малоизученным и перспективным и требует дальнейших изысканий в этом направлении.

Библиографический список

1. Киселев Б.П., Леушин В.А. Сырьевая база России. 1. Ретроспектива // Кокс и химия. 1999. № 11. С. 2–9.
2. Киселев Б. П. О некоторых аспектах угольной базы коксования России в 2008-2009 годах // Кокс и химия. 2009. № 12. С. 9–15.
3. Buczynski R, Weber R, Kim R, Schwöppe P. One-dimensional model of heat-recovery, non-recovery coke ovens. Part I: General description and hydraulic network sub-model. Fuel 2016. Availabe at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.085>.
4. Buczynski R, Weber R, Kim R, Schwöppe P. One-dimensional model of heat-recovery, non-recovery coke ovens. Part II: Coking-bed sub-model. Fuel. 2016. Availabe at: 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.086>.



5. Buczynski R, Weber R, Kim R, Schwöppe P. One-dimensional model of heatrecovery, non-recovery coke ovens. Part III: Upper-oven, down-comers and sole-flues. *Fuel* 2016. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.087>.
6. Степанов Ю.В., Попова Н.К., Кошкарлов Д.А. Обсуждаем статью «О методе фирмы «Ниппон Стил Корпорейшн» – определения прочности кокса после газификации и индекса реакционной способности кокса» // Кокс и химия. 2005. № 5. С. 26–34.
7. Смирнов А. Н., Петухов В. Н., Алексеев Д. И. Анализ принципов построения математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} с целью классификации и разработки концепции гибридной модели // Кокс и химия. 2015. № 5. С. 13–18.
8. Штарк П.В., Степанов Ю.В., Попова Н.К., Ворсина Д.В. Об оценке оптимальности состава угольной шихты // Кокс и химия. 2007. № 3. С. 2–6.
9. Попова Н. К., Степанов Ю. В. Еще раз об оптимизации состава угольной шихты // Кокс и химия. 2013. № 5. С. 10 – 12.
10. Лялюк В.П., Кассим Д.А., Ляхова И.А., Соколова В.П. Влияние оптимизации состава угольной шихты на качество кокса // Кокс и химия. 2012. № 12. С. 13–19.
11. Лялюк В.П., Кассим Д.А., Ляхова И.А., Шмельцер Е.О. Проблемы оптимизации состава угольной шихты // Кокс и химия. 2014. № 1. С. 22–28.
12. Евтушенко В.Ф., Мышляев Л.П., Щелков А.Е., Тараборина Е.Н., Гладштейн М.Н., Школлер М.Б., Гайниева Г.Р. Построение и исследование алгоритма прогнозирования показателей качества кокса с учетом динамики неконтролируемых возмущений // Кокс и химия. 1996. № 6. С. 21–26.
13. Дороганов В. С., Пимонов А.Г. Методы статистического анализа и нейросетевые технологии для прогнозирования показателей качества металлургического кокса // Вестник Кемеровского государственного университета. 2014. № 4 (60) Т. 3. С. 123–129.
14. Станкевич А.С., Станкевич В.С. Методика определения коксующести и технологической ценности углей пластов и их смесей // Кокс и химия. 2012. № 1. С. 4–12.
15. Станкевич А.С., Базегский А.Е. Оптимизация качества кокса ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» с учетом особенностей угольной сырьевой базы // Кокс и химия. 2013. № 10. С. 14–21.
16. Еремин И.В., Гагарин С.Г. Расчет шихт для коксования на основе петрографической модели // Кокс и химия. 1992. № 12. С. 9–15.
17. Гагарин С. Г., Еремин И. В. Компьютерный мониторинг прочности кокса на основе петрографической модели расчета угольных шихт // Кокс и химия. 1995. № 2. С. 10–15.
18. Улановский М. Л., Лихенко А. Н. Оценка угольных шихт заводов Украины по коэффициенту оптимальности марочного состава // Кокс и химия. 2008. № 7. С. 256–259.
19. Гагарин С.Г. Оценка петрографической модели прогноза прочности кокса на примере углей Монголии // Кокс и химия. 2011. № 4. С. 21–26.
20. Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. № 3. С. 62–67.

References

1. Kiselov B. P., Leushin V. A. Raw materials base of Russia. 1. Retrospective view. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 1999, no. 11, pp. 2–9. (In Russian).
2. Kiselov B. P. On some aspects of the coal coking base of Russia in 2008-2009. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry]. 2009, no. 12, pp. 9–15. (In Russian).
3. Buczynski R, Weber R, Kim R, Schwöppe P. One-dimensional model of heat-recovery, non-recovery coke ovens. Part I: General description and hydraulic network sub-model. *Fuel* 2016. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.085>.
4. Buczynski R, Weber R, Kim R, Schwöppe P. One-dimensional model of heat-recovery, non-recovery coke ovens. Part II: Coking-bed sub-model. *Fuel*. 2016. Available at: 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.086>.
5. Buczynski R, Weber R, Kim R, Schwöppe P. One-dimensional model of heatrecovery, non-recovery coke ovens. Part III: Upper-oven, down-comers and sole-flues. *Fuel* 2016. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.087>.
6. Stepanov YU.V., Popova N.K., Koshkarov D.A. Discussion of the article “On the Nippon Steel Corporation method for determining coke strength after gasification and coke reactivity index”. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry]. 2005, no. 5, pp. 26–34. (In Russian).
7. Smirnov A.N., Petukhov V.N., Alekseev D. I. Analysis of construction principles of mathematical models predicting the quality indices of M_{25} and M_{10} coke for the purpose of classification and hybrid model concept development. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2015, vol. 58, no. 5, pp. 170–174. (In Russian).
8. Shtark, P.V., Stepanov, Yu.V., Popova, N.K., Vorsina D.V. On coal charge composition optimality evaluation. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2007, vol. 50, no. 3, pp. 45–49. (In Russian).



9. Popova N.K., Stepanov Yu. V. One more time on the optimization of coal charge composition. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2013, vol. 56, no. 5, pp. 165–166. (In Russian).
10. Lyalyuk, V.P., Kassim. D.A., Lyakhova, I.A., Sokolova, V.P. Influence of coke charge composition optimization on coke quality. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2012, vol. 55, no. 12, pp. 448–452. (In Russian).
11. Lyalyuk, V.P., Kassim. D.A., Lyakhova, I.A., Shmel'tser, E.O. Optimization problems of coal charge composition. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2014, vol. 57, no. 1, pp. 18–23. (In Russian).
12. Evtushenko, V.F., Myshlyaev, L.P., Shchelkov, A.E. Construction and study of the algorithm predicting coke quality with account of the dynamics of uncontrollable perturbations. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 1996, no. 6, pp. 21–26. (In Russian).
13. Doroganov, V.S., Pimonov, A.G. Methods of statistical analysis and neural network technologies for prediction of metallurgical coke quality. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Kemerovo State University], 2014, vol. 3, no. 4(60), pp. 123–129. (In Russian).
14. Stankevich A.S., Stankevich V.S. Procedure for determining coking capacity and technological value of coal from the bed and coal mixtures. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2012, vol. 55, no. 1, pp. 1–9. (In Russian).
15. Stankevich, A.S. and Bazegskii, A.E. Quality optimization of EVRAZ ZSMK JSC coke taking into account the features of coal raw materials base. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2013, vol. 56, no. 10, pp. 364–371. (In Russian).
16. Eremin, I.V. and Gagarin, S.G., Petrographic model-based calculation of charge for coking. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 1992, no. 12, pp. 9–15. (In Russian).
17. Gagarin, S.G., Eremin, I.V. Computer monitoring of coke strength on the basis of the petrographic model of coal charge calculation. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 1995, no. 2, pp. 10–15. (In Russian).
18. Ulanovskii M. L., Likhenko A.N. Evaluation of Ukrainian plants coal charge based on the coefficient of brand composition optimality. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2008, vol. 51, no. 7, pp. 256–259. (In Russian).
19. Gagarin, S.G. Evaluation of the petrographic model of coke strength prediction on example of Mongolian coals. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2011, vol. 54, no. 4, pp. 114–119. (In Russian).
20. Smirnov A.N., Alekseev D.I. Comparison and adequacy analysis of the mathematical models for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 62–67. (In Russian).

Критерии авторства

Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Smirnov A.N., Alekseev D.I. 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.21/23:622.342.1

<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-182-192>

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ТАРОР» (РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН)

© М.М. Солихов¹, А.В. Аксёнов², А.А. Васильев³, М.И. Каримов⁴, О.Б. Рахманов⁵

^{1,2,3,5}Иркутский национальный исследовательский технический университет,

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

⁴Горно-металлургический институт Таджикистана,

Республика Таджикистан, 735030, г. Бустон, ул. Московская, 6.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В настоящее время вопрос создания эффективной технологии переработки упорных золотосодержащих руд является проблематичным, поэтому достижение высокой степени извлечения золота является актуальной задачей. Цель исследований: изучение минерального и химического состава золотосодержащей руды месторождения «Тарор»; проведение серии экспериментов по ультратонкому измельчению руд перед цианированием и обработке пульпы после ультратонкого помола методом атмосферного окисления с последующим цианированием; изучение влияния крупности измельчения на степень извлечения золота при традиционном цианировании; поиск альтернативной технологии извлечения золота из упорных золотосодержащих руд. **МЕТОДЫ.**

При исследовании минералогического состава руды применялись дифрактометрический и количественный способы анализа. Для изучения химического состава пробы были использованы опико-эмиссионный, атомно-абсорбционный, фазовый, ИК-спектроскопический, гравиметрический, титриметрический и фотометрический методы. Содержание золота и серебра определяли с помощью прямого пробирного анализа. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Полученные результаты показали, что руды месторождения «Тарор» относятся к категории упорных руд и традиционным методом цианирования без включения дополнительных операций невозможно достичь приемлемых результатов по извлечению золота. Для данного типа руды использование метода ультратонкого помола с последующим атмосферным окислением позволило увеличить извлечение золота на 7,33%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Применение ультратонкого помола с последующим атмосферным окислением пульпы дает возможность перерабатывать упорные руды, что ранее считалось экономически нецелесообразным. В дальнейшем запланированы исследования данной руды методом флотационного обогащения, проведение серии экспериментов по ультратонкому измельчению флотоконцентратов и обработке пульпы после ультратонкого помола методом атмосферного окисления с последующим цианированием в сорбционном режиме.

Ключевые слова: месторождение «Тарор», упорные золотосодержащие руды, цианирование, бисерная мельница, ультратонкий помол, атмосферное окисление.

Информация о статье. Дата поступления 24 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 23 января 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Солихов М.М., Аксёнов А.В., Васильев А.А., Каримов М.И., Рахманов О.Б. Поиск оптимальной технологической схемы переработки упорных золотосодержащих руд месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 180–190. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-182-192

¹Солихов Мирзобедил Мирзошарифович, аспирант, e-mail: bedil1201@mail.ru

Mirzobedil M. Solikhov, Postgraduate, e-mail: bedil1201@mail.ru

²Аксёнов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, e-mail: aksekov@tomsgroup.ru

Aleksandr V. Aksekov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: aksekov@tomsgroup.ru

³Васильев Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, e-mail: vasiliev@tomsgroup.ru

Andrei A. Vasiliev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: vasiliev@tomsgroup.ru

⁴Каримов Мурад Ильясович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, e-mail: chorchaman@rambler.ru

Murad I. Karimov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy, e-mail: chorchaman@rambler.ru

⁵Рахманов Одилжон Бозорович, аспирант, e-mail: rakhmanov.salam@mail.ru

Odilzhon B. Rakhmanov, Postgraduate, e-mail: rakhmanov.salam@mail.ru



SEARCH FOR OPTIMAL PROCESSING TECHNOLOGY FOR TAROR DEPOSIT REFRACTORY GOLD ORES (REPUBLIC OF TAJIKISTAN)

M.M. Solikhov, A.V. Aksenov, A.A. Vasiliev, M.I. Karimov, O.B. Rakhmanov

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation
Mining and Metallurgical Institute of Tajikistan,
6 Moskovskaya St., Buston 735030, Tajikistan

ABSTRACT. PURPOSE. Today the development of an efficient technology of refractory ore processing is quite problematic, therefore the achievement of high degree of gold recovery is a relevant problem. The purpose of the research includes investigation of mineral and chemical composition of the gold-bearing ore of the Taror deposit, performance of the series of tests on ultrafine grinding (UFG) of ore prior to cyanidation and pulp processing after UFG by the method of atmospheric oxidation followed by cyanidation, study of the ground particle size effect on the degree of Au recovery under conventional cyanidation and search for an alternative technology of gold recovery from refractory gold-bearing ores.

METHODS. Diffractometric and quantitative methods are applied to analyze the mineralogical composition of the ore. Optical emission, atomic absorption, phase, IR-spectroscopic, gravimetric, titrimetric and photometric methods are used to study the chemical composition of the sample. Gold and silver contents are defined using direct fire assays. **RESULTS**

AND THEIR DISCUSSION. The obtained results have shown that the Taror ores refer to refractory ore type. It means that traditional cyanidation method without application of any additional process operations fails to present any acceptable results on gold recovery. Application of the UFG method followed by atmospheric oxidation has increased gold recovery by 7.33% for this type of ore. **CONCLUSION.** Application of UFG followed by atmospheric oxidation enables efficient processing of refractory ores, which was considered earlier economically unviable. It is planned to study this type of ore further by flotation concentration methods, carry out a series of tests on flotation concentrate UFG and atmospheric oxidation of ultrafine ground pulp with the following cyanidation in the sorption mode.

Keywords: Taror deposit, refractory gold(-bearing) ores, cyanidation, bead mill, ultra-fine grinding (UFG), atmospheric oxidation

Article info. Received December 24, 2017; accepted January 23, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Solikhov M.M., Aksenov A.V., Vasiliev A.A., Karimov M.I., Rakhmanov O.B. Search for optimal processing technology for Taror deposit refractory gold ores (Republic of Tajikistan). Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 180–190. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-182-192

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей, стоящей перед золотодобывающими компаниями, является определение экономически выгодного варианта переработки упорных труднообогатимых руд, поскольку месторождения легкообогатимых золотосодержащих руд истощаются. Причинами упорности руд могут быть: наличие тонкодисперсного золота, которое вкраплено в пирит, арсенопирит или в другие нераскрываемые сульфиды, а также сорбционная активность природных органических веществ [1].

В Республике Таджикистан к данному упорному типу руды относится, например, руда Тарорского месторождения золотосодержащих руд, которая перерабатывается на базе таджикско-китайского предприятия СП «Зарафшан».

Золотоизвлекательная фабрика СП «Зарафшан» была создана в 1994 году на базе бывшего Таджикского золоторудного

комбината совместно с британской компанией «Commonwealth & British Mineral Co. Ltd» (рис. 1). В середине 2007 года акции предприятия приобрела компания «Zijin Mining Group Co. Ltd» (Китай) [2].

Главный продукт фабрики – золото-серебряный сплав золота лигатурного, который в последующем рафинируется до химически чистого золота пробы 99,99 и серебра пробы 99,93.

Месторождения «Тарор», «Джилау» и ряд других являются основной сырьевой базой СП «Зарафшан».

Золоторудное месторождение «Тарор» открыли в северной части Республики Таджикистан в 1937 году. В настоящее время месторождение вскрыто тремя горизонтальными штольнями, соединяющимися слепым стволом и тремя подэтажами. Руды Тарорского месторождения – золото-медно-мышьяковистые, окисленные в верхних горизонтах (1760–1530 м) и пере-



Рис. 1. Золотоизвлекающая фабрика СП «Зарафшан»
Fig. 1. Gold concentration plant of the Joint Venture company «Zarafshan»

ходящие в срединную часть месторождений, а также первичные (сульфидные) с горизонта ниже 1530 м.

На всем протяжении разведки Тарорского месторождения производились технологические испытания различных сортов руд с целью изучения технологии и разработки рациональной схемы их переработки.

В шестидесятых годах XX века в Северо-Кавказском горно-металлургическом институте, ЦНИГРИ, Забайкальском научно-исследовательском институте, АО «Иргиредмет» и других научно-исследовательских организациях проводились лабораторные и полупромышленные испытания технологических проб руд месторождения «Тарор». По итогам исследований была предложена технологическая схема с применением цианирования хвостов флотации, но полученные результаты не удовлетворяли экономическим и экологическим требованиям.

На базе Тарорского месторождения в 2010 года компания «Zijin Mining Group Co., Ltd» начала эксплуатацию новой фабрики с производительностью 2 тыс. т руды в сутки по схеме прямого цианирования с последующей сорбцией золота на активированный уголь, но вскоре из-за низкого уровня извлечения золота (60–65%) и загрязнения окружающей среды мышьяковистыми отходами производство приостановилось.

В настоящее время СП «Зарафшан» в основном перерабатывает руды месторождения «Джилау», но с мая 2016 года третья линия фабрики вновь занялась упорными рудами месторождения «Тарор». Переработка осуществляется флотацией с выпуском золото-медно-мышьяковистого концентрата. В дальнейшем флотоконцентраты отправляются в Республику Казахстан. Хвосты флотации перерабатываются на базе золотоизвлекающей фабрики по технологии аммиачного цианирования с целью извлечения золота [3].

Методы исследования

С целью определения оптимального технологического режима и повышения извлечения золота авторами была отобрана проба из нижних горизонтов месторождения «Тарор».

В настоящей работе представлены результаты минерального и химического состава пробы упорной руды месторождения «Тарор». Было проведено несколько тестов по цианированию исходного мате-



риала крупностью 80%: -71, -53, -45, -30 и -20 мкм.

Минеральный состав пробы руды определяли с применением различных методов анализа. Выполнены дифрактометрический, количественный и минералогический анализы.

Дифрактометрический анализ позволил определить состав руды по основным минералам, массовая доля которых составляет 1% и более (анализ выполнен на пробе исходной руды крупностью 95% – 0,071 мм).

В табл. 1 приведен минеральный состав пробы руды (данные минералогического анализа).

По данным дифрактометрического анализа, минеральный состав пробы руды месторождения «Тарор» на 92% представлен породообразующими минералами. Основным из них является кварц (21%). Карбонаты представлены доломитом в количестве 18%. Массовая доля талька, кальцита и амфиболов находится на одном

уровне: 9,0, 10,0, 11,0% соответственно. В значительно меньших количествах присутствуют диопсид, серпентин, хлорит, биотит и гипс.

Рудная минерализация представлена сульфидными минералами, главным образом арсенопиритом, халькопиритом и пиритом, в общем количестве 8%.

Степень окисления руды, рассчитанная по железу, составляет 51,3%. Данный показатель позволяет характеризовать руду как смешанную, близкую к первичному типу.

Для определения химического состава пробы руды рудного тела месторождения «Тарор» использовались оптико-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой, атомно-абсорбционный, ИК-спектроскопический, гравиметрический, титриметрический и фотометрический методы анализа. Содержание золота определялось пробирным методом. Результаты химического и пробирного анализа исходной руды представлены в табл. 2.

Таблица 1

Минеральный состав пробы руды месторождения «Тарор»

Table 1

Mineral composition of the ore sample from the Taror deposit

Минерал, группа минералов / Mineral, group of minerals	Массовая доля, % / Mass fraction, %
Породообразующие минералы / Rock-forming minerals	
Кварц / Quartz	21,0
Доломит / Dolomite	18,0
Амфиболы / Amphiboles	11,0
Кальцит / Calcite	10,0
Тальк / Talc	9,0
Диопсид / Diopside	7,0
Серпентин / Serpentine	6,0
Хлорит / Chlorite	4,0
Биотит / Biotite	3,0
Гипс / Gypsum	3,0
Рудообразующие минералы / Ore-forming minerals	
Арсенопирит / Arsenopyrite	3,3
Халькопирит / Chalcopyrite	2,3
Пирит / Pyrite	2,4
Итого / Total	100,0



Таблица 2

Химический состав и пробирный анализ пробы руды месторождения «Тарор»

Table 2

Chemical composition and a fire assay test for the ore sample from the Taror deposit

Компоненты / Components	Массовая доля, % / Mass fraction, %	Компоненты / Components	Массовая доля, % / Mass fraction, %
Al ₂ O ₃	4,95	Ba	0,042
CaO	12,0	Bi	0,013
Fe ₂ O ₃	9,41	Cd	0,0004
MgO	13,0	Cr	0,0031
MnO	0,085	Co	0,0015
P ₂ O ₅	0,103	Cu	0,82
K ₂ O	1,59	Pb	0,0025
Na ₂ O	<1,0	Sb	0,016
TiO ₂	0,187	Mo	0,0008
SiO ₂	38,2	Ni	<0,0010
Fe общее / Fe general	6,02	Sr	0,0080
Fe окисленное / Fe oxygenized	3,09	Sn	<0,0050
Fe сульфидное / Fe sulfide	2,93	W	<0,0050
S общая / S general	3,26	Zn	0,0088
S окисленная / S oxygenized	2,44	CO ₂ карбонатный / CO ₂ carbonate	9,20
S сульфатная / S sulfate	0,32	C общий / C general	2,61
S элементарная / S elemental	<0,50	Ag г/т / Ag g/t	20,28
AS общий / As general	1,52	Au г/т / Au g/t	7,35

Результаты и их обсуждение

Из данных табл. 2 видно, что химический состав пробы на 79,00% представлен литофильными компонентами, основным из которых является кремнезем (38,20%). Необходимо также отметить высокое содержание кальция (12,00%) и магния (13,00%). Углерод в пробе находится в количестве 2,61% и полностью входит в состав карбонатов.

Рудообразующие элементы представлены главным образом железом, серой, мышьяком и медью. Массовая доля железа составляет 6,02, серы – 3,26, мышьяка – 1,52 и меди – 0,82%.

Из вредных примесей в пробе присутствует мышьяк (1,52%). Основным ценным компонентом в пробе является золото, серебро может извлекаться попутно.

Для определения упорности и выбора оптимальной крупности материала выполнены тесты по цианированию пробы

исходной руды крупностью 80% класса -71, -53 и -45 мкм. Измельчение проб проводили в шаровой мельнице.

Для оценки сорбционной активности компонентов руды по отношению к золоту тесты проводили без загрузки сорбента и в сорбционном режиме цианирования.

Параметры выщелачивания, одинаковые для всех тестов, представлены в табл. 3. В ходе тестов вели контроль концентрации NaCN, pH пульпы.

Результаты тестов приведены в табл. 4.

Полученные результаты показывают высокий расход цианида, низкое извлечение золота и отсутствие у руды сорбционной активности по отношению к золоту.

Полный расход NaCN в среднем находится на уровне 9,5 кг/т, CaO – 2,87 кг/т. Расход цианида натрия с учетом остатка реагентов в растворе для тестов,



Таблица 3

Параметры агитационного цианирования руды

Table 3

Parameters of ore agitated cyanidation

Параметры / Parameters	Единица измерения / Unit of measurement	Значение / Value
Масса материала / Material weight	г / g	100
Тип и объем емкости для выщелачивания / Type and volume of a leaching tank	л / l	Чан, 1 / Tank, 1
Продолжительность цианирования / Cyanidation time	ч / h	48
Плотность пульпы / Pulp density	–	40% твердого / 40% solids
Концентрация цианида / Cyanide concentration	%	0,2
Концентрация извести (щелочи) / Lime (alkali) concentration	%	0,02
Вид сорбента / Sorbent type	–	Активированный уголь Norit RO 3520 / Activated carbon Norit RO 3520
pH пульпы / Pulp pH	–	10,5
Загрузка угля при сорбционном цианировании / Carbon load under sorption cyanidation	% от объема пульпы / % of the pulp volume	10

Таблица 4

Результаты цианирования исходной руды (данные по золоту и расходу реагентов)

Table 4

Results of head ore cyanidation (data on gold and reagent consumption)

Расход реагента при сорбционном цианировании / Reagent consumption at sorption cyanidation							
Опыт / Test	Крупность материала, мкм / Particle size, μm	Содержание Au, г/т / Au grade, g/t		Извлечение Au, % / Au recovery, %	Расход реагента, кг/т руды / Reagent consumption, kg/t of ore		CaO
		в исходном / in original	в кеке / in cake		NaCN		
Полный / Total	С учетом остатка / with ac- count of residual						
Сорбционное цианирование / Sorption cyanidation							
1	80% -71	7,35	1,66	77,41	9,21	7,80	2,87
2	80% -53		1,48	79,86	9,47	7,82	2,87
3	80% -45		1,4	80,97	10,05	8,51	2,87
Цианирование без загрузки сорбента / Cyanidation without sorbent							
1	80% -71	7,3	1,75	76,19	7,73	5,73	2,87
2	80% -53		1,58	78,50	10,10	6,90	2,87
3	80% -45		1,48	79,86	10,41	7,67	2,87



проводимых в сорбционном режиме и без загрузки сорбента, составил в среднем 7,4 кг/т.

Таким образом, опыты по цианированию исходной руды месторождения «Тарор» при крупности 80%: -71 мкм, -53 мкм и -45 мкм – не позволили получить приемлемого извлечения золота.

Результаты проведенных тестов свидетельствуют, что проба по технологическим особенностям относится к категории упорных к цианированию руд, в которых золото находится в тонковкрапленном состоянии с кварцем, сульфидами и породообразующими минералами [4–6].

Руды с тонковкрапленным золотом и серебром наиболее широко распространены в природе, занимая в этом отношении ведущее место среди всех технологических типов упорного сырья [5]. Эффективной переработки таких руд, в принципе, можно добиться двумя путями. В первом из них предлагается сохранение цианирования как основного метода получения конечного товарного золотосодержащего продукта. Обеспечение показателей извлечения золота в данном случае достигается за счет включения в технологическую схему дополнительных операций [6] (рис. 2).

Второй вариант переработки упорных золотосодержащих руд предусматривает включение в схему цианирования специальных приемов или замену цианида

другими химическими растворителями, по отношению к которым упорность руды становится меньше.

В мировой практике, кроме вышеизложенных методов, разработаны другие методы вскрытия упорного золота. Так, для переработки руды Тарорского месторождения потенциально эффективной технологией может являться применение тонкого и ультратонкого помола. С целью предотвращения химической активации материала (изменения его химических и физических свойств) предлагается обработка тонкоизмельченного материала в окислительной атмосфере в слабощелочной среде [7–9].

Достоинство атмосферного окисления заключается в создании условий для образования гетита FeOOH , который в цианистых растворах не растворяется, и это позволяет снизить расход цианида.

Предлагаемая технология на основе ультратонкого измельчения и атмосферного окисления по капитальным затратам в 4 раза дешевле автоклавного окисления и в 2 – бактериального, а по эксплуатационным расходам, соответственно, экономически более выгодно в 8–9 раз [10, 11]. Исходя из вышеприведенных доводов, для следующей серии экспериментов авторами была выбрана данная технология.

Схема подготовки руд к цианированию указана на рис. 3.

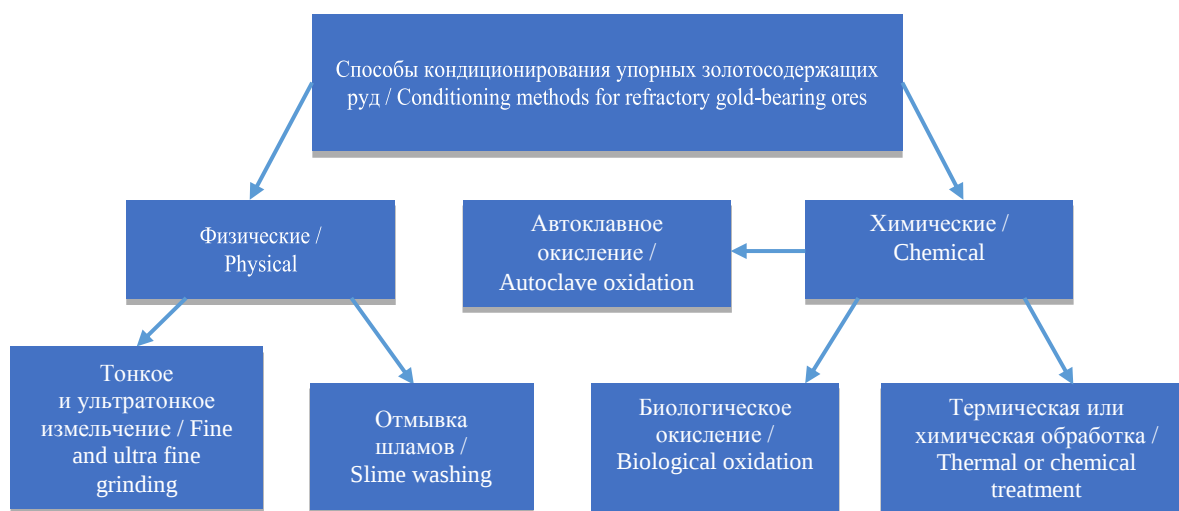


Рис. 2. Способы кондиционирования упорных золотосодержащих руд
Fig. 2. Conditioning methods for refractory gold-bearing ores

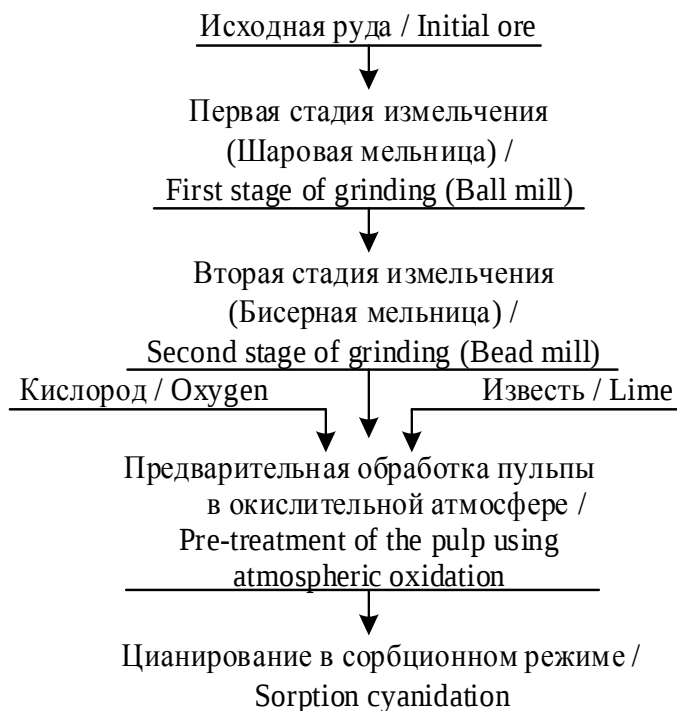


Рис. 3. Схема подготовки руд к цианированию
Fig. 3. Flowsheet of ore preparation for cyanidation

На первой стадии измельчали исходную руду в шаровой мельнице до крупности 80%, -71 мкм при следующих условиях: масса материала 1 кг, масса мелющих тел (шары из низкоуглеродистой стали) 7 кг, при Т:Ж = 1:0,5, без добавки реагентов. Затем с целью изучения влияния ультратонкого измельчения на степень извлечения золота было отобрано две навески по

100 г для проведения следующей стадии измельчения.

Для ультратонкого измельчения исходной руды в лабораторных условиях выбрали лабораторную бисерную мельницу производства компании NETZSCH (Германия), рис. 4.

В табл. 5 приведены стандартные значения параметров измельчения.

Таблица 5

Стандартные параметры процесса измельчения

Table 5

Standard grinding parameters

Параметры / Parameters	Значение / Value
Объем мельницы, л / Mill volume, l	0,6
Масса загружаемого материала, г / Weight of loaded material, g	100
Начальная крупность материала, мкм / Feed particle size, μm	Не более 150–200 / Not more than 150–200
Масса бисера, г / Weight of beads, g	1100
Объем воды, мл / Water volume, ml	200
Частота вращения импеллера, об./мин / Impeller rotation frequency, rpm	1300
Продолжительность измельчения, мин / Grinding time, min	0,1–90



При работе на бисерной мельнице использовали шихту из керамического бисера следующего состава: 40% – бисер диаметром 3,5 мм, 40% – бисер диаметром 2,0 мм и 20% – бисер диаметром 1,5 мм.

Руду измельчали в лабораторной бисерной мельнице (рис. 4) до крупности 80%, -30 и -20 мкм, затем подвергали атмосферному окислению с добавкой СаО при $\text{pH} = 9$, продолжительность окисления составляла 24 ч; далее проводили цианирование в сорбционных режимах: при отношении Ж:Т = 2:1, концентрация NaCN 0,2%, продолжительность 48 ч, в присутствии активного угля марки Norit RO 3520. Загрузка угля от объема жидкой фазы составляла 10%, концентрация извести (щелочи) – 0,01%, температура – 18 °С, pH пульпы – 10,5.

В табл. 7 приведены результаты тестов по изучению влияния крупности измельчения на извлечение золота из исходной руды месторождения «Тарор».

Анализ данных, представленных в табл. 4 и 6, показывает, что извлечение зо-

лота после ультратонкого помола и атмосферного окисления составило 88,30%, что на 7,33% больше в сравнении с первоначальными экспериментами.

Расход цианида в лабораторных тестах не снизился относительно расхода без ультратонкого измельчения и атмосферного окисления и составил 9,5 кг/т.

Однако следует отметить, что процесс атмосферного окисления воспроизводится в лабораторных условиях недостаточно полноценно, поэтому необходимо выполнить моделирование в пилотной установке атмосферного окисления.

Вместе с тем даже двукратное снижение расхода цианида не будет считаться удовлетворительным, поскольку делает переработку нерентабельной. В этой связи целесообразно рассмотреть вариант схемы с предварительным флотационным концентрированием Au перед ультратонким измельчением и атмосферным окислением.

Данный прием потенциально позволит сократить удельный расход NaCN на переработку руды.

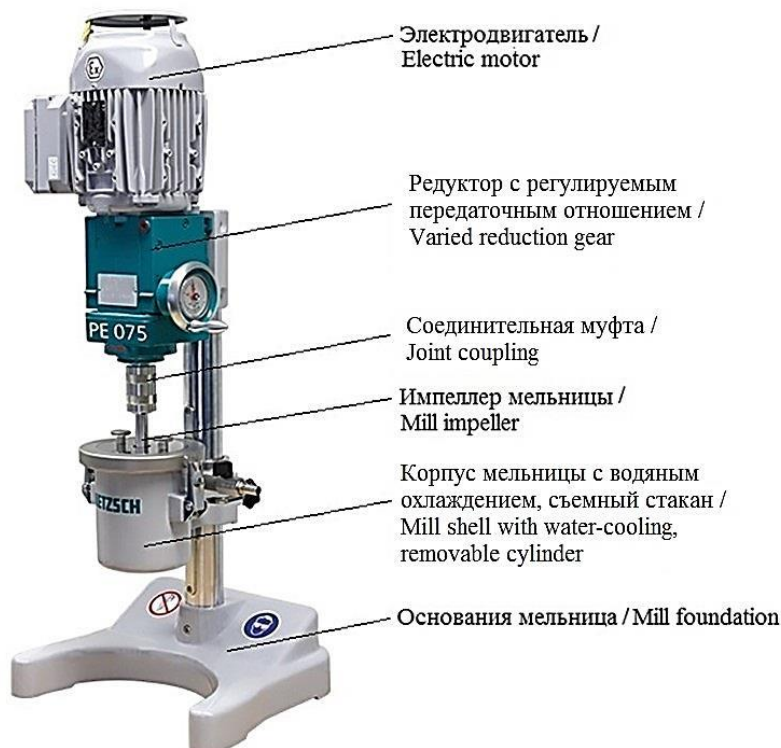


Рис. 4. Лабораторная бисерная мельница, (объем 0,6 л) NETZSCH
Fig. 4. Laboratory bead mill (0.6 l volume) NETZSCH



Таблица 6

Результаты тестов по изучению влияния крупности измельчения на извлечение золота из исходной руды месторождения «Тарор»

Table 6

Test results of studying grind size effect on Au recovery from the Taror deposit head ore

Опыт / Test	Крупность материала, мкм / Particle size, μm	Содержание Au, г/т / Au grade, g/t		Извлечение Au, % / Au recovery, %	Расход реагента, кг/т руды / Reagent consumption, kg/t of ore		
		в исходном / in original	в кеке / in cake		NaCN		CaO
					Полный / Total	С учетом остатка / with ac- count of residual	
Сорбционное цианирование / Sorption cyanidation							
1	80%, -30	7,35	0,92	87,48	12,30	11,15	0,97
2	80%, -20	–	0,86	88,30	13,38	12,36	0,97

Заключение

По результатам данных, полученных в результате лабораторных исследований, можно заключить, что руды из месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) относятся к числу упорных руд с тонковкрапленным золотом и традиционными способами, без использования дополнительных методов, невозможно достичь высокой степени извлечения золота из них.

Применение ультратонкого помола с последующим атмосферным окислением пульпы позволяет достичь приемлемого извлечения ценного компонента из упорных

руд, переработка которых ранее считалась экономически нецелесообразной.

В дальнейшем с целью получения более высокого извлечения золота авторами работы планируется переработка данного типа руд методом флотационного обогащения с получением сульфидного концентрата и проведение серии экспериментов по ультратонкому измельчению флотоконцентратов с обработкой полученного продукта методом атмосферного окисления с последующим цианированием в сорбционном режиме.

Библиографический список

1. Mark Aylmore Ashraf Jaffer. Evaluating process options for treating some refractory ores // ALTA 2012 GOLD CONFERENCE. May 31–June 1, 2012, Burswood Convention Centre Perth, Australia, pp. 249–290.
2. СП Зарафшон [Электронный ресурс]. URL: http://www.tajik-gateway.org/wp/?page_id=26587 (12.11.2017).
3. Бобоев И.Р., Стрижко Л.С. Влияние ультратонкого измельчения на технологические показатели автоклавного окисления упорного золото-медно-мышьяковистого флотоконцентрата // Известия вузов. Цветная Metallurgy. 2017. № 5. С. 13–18.
4. Лодейщиков В.В. Техника и технология извлечения золота из руд за рубежом. М.: Metallurgy, 1973. 283 с.
5. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. В 2х томах. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. Т. 1. 342 с.

6. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Руда и металлы, 2013. 452 с.
7. Senchenko A.E., Aksenov A.V. Atmospheric oxidation of refractory gold-containing concentrates and ores // XXVI International Mineral Processing Congress – IMPC 2012, New Delhi, India. September 24–28, 2012, pp. 4851–4856.
8. Аксенов А.В., Васильев А.А. Способ вскрытия тонковкрапленного золота из упорного сульфидного сырья на основе сверхтонкого измельчения и атмосферного окисления // Научно-практическая конференция «Перспективы развития, экологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств». Иркутск: ИрГТУ, 2009. С. 9–11.
9. Forest P.W., Madeline E.S., Donald J.R. Kinetics of arsenopyrite oxidative dissolution by oxygen. Geochim. Cosmochim. Acta. 2006, vol. 70, pp. 1668–1676.



10. Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 2. С. 204–218.
11. Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Минеев Г.Г., Солихов М.М., Шомуродов Х.Р. Поиск рациональной тех-

нологии переработки упорных золотосодержащих руд с тонковкрапленным золотом месторождения «Иккижелон» (Северный Таджикистан) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 6. С. 119–127. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-6-119-127

References

1. Mark Aylmore Ashraf Jaffer. Evaluating process options for treating some refractory ores // ALTA 2012 GOLD CONFERENCE. May 31–June 1, 2012, Burswood Convention Centre Perth, Australia, pp. 249–290.
2. Zarafshon. Available at: http://www.tajik-gateway.org/wp/?page_id=26587 (accessed 12 November 2017)
3. Boboev I.R., Strizhko L.S. Vliyanie ul'tratonkogo izmel'cheniya na tekhnologicheskie pokazateli avtoklavnogo okisleniya upornogo zoloto-mednomysh'yakovistogo flotokontsentrata [Ultrafine grinding effect on autoclave oxidation process performance for refractory gold-copper-arsenic flotation concentrate]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy], 2017, no. 5. pp. 13–18. (In Russian).
4. Lodeishchikov V.V. Tekhnika i tekhnologiya izvlecheniya zolota iz rud za rubezhom [Equipment and technology of gold recovery from ores: foreign experience]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973, 283 p. (In Russian).
5. Lodeishchikov V.V. Tekhnologiya izvlecheniya zolota i serebra iz upornykh rud. V 2kh tomakh [Technology of gold and silver recovery from refractory ores: in 2 volumes]. Irkutsk, Irigiredmet Publ., 1999, vol. 1, 342 p. (In Russian).
6. Zakharov B.A., Meretukov M.A. Zoloto: upornye rudy [Gold: refractory ores]. Moscow, Ore and Metals Publ., 2013, 452 p. (In Russian).
7. Senchenko A.E., Aksenov A.V. Atmospheric oxidation of refractory gold-containing concentrates and ores // XXVI International Mineral Processing Congress – IMPC 2012, New Delhi, India. September 24–28, 2012, pp. 4851–4856.

8. Aksenov A.V., Vasiliev A.A. *Sposob vskrytiya tonkovkraplennogo zolota iz upornogo sul'fidnogo syr'ya na osnove sverkh-tonkogo izmel'cheniya i atmosfernogo okisleniya* [Method of finely disseminated gold extraction from refractory sulphide raw material based on ultrafine grinding and atmospheric oxidation]. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Perspektivy razvitiya, ekologii i avtomatizatsii khimicheskikh, pishchevykh i metallurgicheskikh proizvodstv»* [Research and practice conference "Development, ecological and automation prospects of chemical, food and metallurgical plants]. Irkutsk, ISTU Publ., 2009, pp. 9–11. (In Russian).
9. Forest P.W., Madeline E.S., Donald J.R. Kinetics of arsenopyrite oxidative dissolution by oxygen. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2006, vol. 70, pp. 1668–1676.
10. Komogortsev B.V., Varenichev A.A. *Problemy pererabotki bednykh i upornykh zolotosoderzhashchikh rud* [The problems of processing poor and refractory gold-bearing ores]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2016, no. 2, pp. 204–218. (In Russian).
11. Rakhmanov O.B., Aksenov A.V., Mineev G.G., Solikhov M.M., Shomyrodov Kh.R. *Poisk ratsional'noi tekhnologii pererabotki upornykh zolotosoderzhashchikh rud s tonkovkraplennym zolotom mestorozhdeniya «Ikkizhelon» (Severnyi Tadzhikistan)* [Search for the rational technologies to process refractory gold ores with finely disseminated gold from the Ikkizhelon deposit (North Tajikistan)]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 6, pp. 119–127. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-119-127>

Критерии авторства

Солихов М.М., Аксёнов А.В., Васильев А.А., Каримов М.И., Рахманов О.Б. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Solikhov M.M., Aksenov A.V., Vasiliev A.A., Karimov M.I., Rakhmanov O.B. have equal copyrights 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.



НЕСУЩАЯ СИСТЕМА ЭКРАНОПЛАНА СХЕМЫ «ТАНДЕМ» И ЕЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© Ю.Ф. Вшивков¹, Е.А. Галушко², С.М. Кривель³

^{1,2,3}Иркутский государственный университет,

Российская Федерация, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1.

²Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации,
Российская Федерация, 664047, г. Иркутск, ул. Коммунаров, 3.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Работа посвящена обоснованию предлагаемой авторами компоновки несущей системы экраноплана и исследованию ее аэродинамических характеристик. **МЕТОДЫ.** На основе анализа известных аэродинамических компоновок экраноплана и их особенностей авторами предлагается оригинальная компоновка несущей системы экраноплана. Аэродинамические исследования выполнены на основе вычислительного эксперимента с использованием пакета программ ANSYS. Представлена постановка задачи, граничные условия и особенности построения математической модели обтекания несущей системы в ANSYS с обоснованием выбранных подходов. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В статье представлены некоторые результаты исследований аэродинамических характеристик экраноплана, использующего предлагаемую несущую систему. Полученные данные позволяют судить об аэродинамических характеристиках предлагаемой компоновки, их зависимости от основных полетных параметров (угла атаки и высоты полета), о возможностях воздействия на их величины отклонением управляющих поверхностей (УП). Рассмотрены особенности обтекания несущей системы, обеспечивающие ее высокие несущие свойства и безотрывное обтекание при значительных углах установки несущих поверхностей по отношению к набегающему потоку. Представленные результаты позволяют оценить возможности реализации задач проектирования, положенные в основу целевой установки формирования предлагаемой компоновки несущей системы. **ВЫВОДЫ.** Предложенная компоновка обеспечивает широкий диапазон эксплуатационных скоростей полета экраноплана, возможность полета с достаточно малыми скоростями. Малые скорости горизонтального полета экраноплана позволяют уменьшить скорость перехода в режим полета на взлете и в режим статической воздушной подушки и глиссирования на посадке, позволяют маневрировать с меньшими радиусами разворота в горизонтальной плоскости в полете по маршруту.

Ключевые слова: экраноплан, экранолет, динамическая воздушная подушка, аэродинамика экраноплана, компоновка экраноплана, летные характеристики экраноплана.

Информация о статье. Дата поступления 22 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 05 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Несущая система экраноплана схемы «тандем» и ее аэродинамические характеристики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 191–206. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-193-208

CARRYING SYSTEM OF THE GROUND-EFFECT VEHICLE OF «TANDEM» SCHEME AND ITS AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

Yu.F. Vshivkov, E.A. Galushko, S.M. Krivel

Irkutsk State University,

1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003, Russian Federation

Irkutsk branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation,

3, Kommunarov St., Irkutsk, 664047, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The work deals with the justification of the proposed by the authors aerodynamic configuration of the carrying system of the wing-in-ground-effect (WIG) craft and the study of its aerodynamic characteristics.

¹Вшивков Юрий Федорович, научный сотрудник, e-mail: 1988ufv@mail.ru

Yuriy F. Vshivkov, Researcher, e-mail: 1988ufv@mail.ru

Галушко Егор Александрович, аспирант, преподаватель, e-mail: photon_91@mail.ru

Egor A. Galushko, Post-graduate student, Lecturer, e-mail: photon_91@mail.ru

²Кривель Сергей Михайлович, доцент кафедры математического анализа и дифференциальных уравнений, e-mail: krivel66@mail.ru

Sergey M. Krivel, Associate Professor of the Department of Mathematical Analysis and Differential Equations, e-mail: krivel66@mail.ru



METHODS. Based on the analysis of known ground effect vehicle aerodynamic configurations and their features the authors propose an original aerodynamic configuration of the WIG craft carrying system. Aerodynamic studies are performed on the basis of a computational experiment using the ANSYS software package. The article presents the formulation of the problem, boundary conditions and the features of building a mathematical model of carrying system flow in ANSYS with the justification of the selected approaches. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The article presents some results of studying aerodynamic characteristics of the WIG craft using the proposed carrying system. The aerodynamic characteristics of the proposed configuration, their dependence on the main flight parameters such as the angle of attack and the altitude of flight, the possibility to control their values by the deflection of control surfaces are assessed on the basis of the obtained data. Consideration is also given to the features of flow around the carrying system that ensure its high load-carrying properties and continuous flow around at significant carrying surface angles against the incoming flow. The presented results allow to evaluate the possibilities to implement design tasks which serve the basis for the target to form the proposed aerodynamic configuration of the carrying system. **CONCLUSIONS.** The proposed aerodynamic configuration provides a wide range of WIG flight operation speeds as well as the possibility to fly at sufficiently low speeds. The low speeds of WIG horizontal flight allow to reduce the transition speed to the flight mode at taking-off and to the mode of static air cushion and aquaplaning at landing, which enables maneuvering with smaller turning radii in the horizontal plane when flying on the route.

Keywords: *wing-in-ground craft (WIG), ground-effect vehicle (GEV), dynamic air-cushion, WIG aerodynamics, aerodynamic configuration of a WIG craft, flight characteristics of a WIG craft.*

Article info. Received December 22, 2017; accepted February 05, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Krivel S.M. Carrying system of the ground-effect vehicle of «tandem» scheme and its aerodynamic characteristics. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 191–206. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-193-208

Введение

Разработка и проектирование транспортных средств, использующих динамическую воздушную подушку (экраноплан), остается актуальной задачей в рамках задачи создания новых высокоскоростных видов транспорта. Потенциально экраноплан может обладать амфибийностью, высоким аэродинамическим качеством и транспортной скоростью на маршруте, возможностью круглогодичной эксплуатации. Транспортная система на основе экранопланов может позволить реализовать значительный экономический и социальный эффект в сравнении с традиционными видами транспорта.

В настоящее время продолжается поиск наиболее эффективных (рациональных) аэродинамических компоновок экранопланов и их параметров. Достаточно условно можно выделить следующие, получившие наибольшее распространение, «классические» типы аэродинамических компоновок экранопланов: «самолетная», «летающее крыло», «летающая платформа», «тандем», «утка» и «составное крыло».

Наиболее известными представителями «самолетной» схемы являются

экранопланы с хвостовым высокорасположенным горизонтальным оперением А.М. Липиша и Р.Е. Алексеева [1, 2]. У экранопланов данной схемы удалось добиться приемлемых сравнительно высоких эксплуатационных характеристик продольной устойчивости на различных отстояниях от экрана. Аппараты такой компоновки обладают удовлетворительной мореходностью, как правило, реализуют применение поддува под крыло. К недостаткам данной схемы можно отнести высокие значения площадей горизонтального (40–50% и более от площади основного крыла) и вертикального оперения. Это приводит к увеличению профильного сопротивления, снижению аэродинамических качеств, увеличению массы аппарата.

Схема «летающее крыло» не нашла широкого применения. Макет экраноплана данной схемы был разработан Р.Е. Алексеевым [2], известен опытный образец экраноплана такой схемы Б.С. Берковского [3]. Компоновка, очевидно, обладает наименьшим уровнем «вредного» аэродинамического сопротивления вследствие отсутствия развитого фюзеляжа и, возможно, оперения. Кроме этого, можно предпо-



ложить, что компоновка потенциально позволяет создать условия для реализации эффективных воздушных подушек – статической и динамической. К основным недостаткам компоновки можно отнести сложность решения проблем устойчивости в полете и на режимах взлета и посадки, обеспечения требуемой маневренности по курсу, мореходности (особенно для малых экранопланов). Экранопланы (самолеты) такой схемы обладают сравнительно большими потерями аэродинамического качества – именно так принято и используется во всех учебниках по динамике полета – потери аэродинамического качества на балансировку (в смысле – на уравнивание) и управление (в смысле – изменение параметров полета).

Отличительной особенностью экраноплана схемы «летающая платформа» от экраноплана схемы «летающее крыло» является то, что крыло данного экраноплана имеет большую хорду и малое удлинение. Схема «летающая платформа», как правило, имеет близкое к прямоугольному крыло малого удлинения, фюзеляж, вертикальное и горизонтальное оперение. Обычно крыло оснащено развитыми законцовками (скегами, поплавками). Наиболее известными представителями экранопланов данной схемы стали экранопланы «Волга-2» (главный конструктор В.В. Соколов) и «Акваглайд» (главный конструктор Д.Н. Синицын) [4]. Экранопланы этой компоновки не позволяют реализовать высокие летно-технические данные на этапе полета в силу присущих крылу малого удлинения невысоких несущих свойств и аэродинамического качества на балансировку и управление.

Достаточно часто реализуются попытки создать экраноплан на основе схемы «Тандем» (например, экранопланы Г.В. Йорга) [1, 2]. Обычно такая компоновка включает в себя два несущих крыла малого удлинения, расположенных друг за другом. Крылья могут иметь различные удлинения и другие геометрические характеристики, часто конструктивно образуют единую несущую систему с дополнительными соеди-

няющими элементами. Такая компоновка потенциально позволяет обеспечить самостабилизацию экраноплана, заданные характеристики устойчивости, удовлетворительные взлетно-посадочные характеристики. Эти свойства обеспечиваются прежде всего благодаря тандемному расположению крыльев на определенном расстоянии друг от друга, что дает широкие возможности по обеспечению полетного и взлетно-посадочного положений экраноплана относительно поверхности.

В отдельный вид можно выделить пространственную компоновку «тандем», ее отличительной особенностью является то, что крылья расположены на значительном расстоянии друг от друга по высоте [5]. Представителем данной компоновки является новейший российский экраноплан «Чайка», компоновка которого широко представлена в средствах массовой информации. Несущая система такого аппарата состоит из двух поверхностей, объединенных в единую конструкцию концевыми вертикальными поверхностями. Экраноплан может обладать развитым вертикальным и горизонтальным оперением.

Схема «утка», несмотря на ожидаемые преимущества, также не получила широкого распространения. Наиболее известными представителями этого класса являются экранопланы, созданные под руководством А.Н. Панченкова [3]. К потенциальным преимуществам данной схемы можно отнести возможности реализации свойства самостабилизации сравнительно большого аэродинамического качества. Однако следует заметить, что реализовать данные ожидания в реальных конструкциях удалось не в полной мере. Основным недостатком компоновки «утка» является возможность устойчивого полета только на малых отстояниях от экрана. Некоторые исследователи отрицают возможность создания устойчивого в продольном движении экраноплана схемы «утка» [6]. Кроме этого, крайне сложно добиться положительной с точки зрения требований аэродинамики интерференции между элементами компоновки. Представляет опасность



возможность появления срыва потока на переднем горизонтальном оперении при маневрировании с последующим переходом аппарата в пикирование.

Компоновка экраноплана «составное крыло» представляет собой разделение несущего крыла на две функциональные части: центроплан малого удлинения, который максимально реализует возможности поддува под крыло и экранный эффект, и консоли значительного удлинения, обеспечивающие высокое аэрогидродинамическое качество и устойчивость полета в широком диапазоне высот (отстояний) полета [1, 2]. По данной схеме спроектированы экранопланы «ВВА-14» (Р.Л. Бартини) [7], «Иволга» (В.В. Колганов) [8], «Орион» (О.А. Волик) [9]. В настоящее время именно экранопланы компоновки «составное крыло» представляют класс наиболее успешных экранопланов с точки зрения внедрения в реальный сектор эксплуатации.

Основными задачами проектирования экранопланов (в различной степени реализованными в указанных выше компоновках) являлись обеспечение, в первую очередь высокого аэродинамического качества на основных эксплуатационных режимах движения, приемлемой устойчивости в продольном движении и характеристики взлета и посадки аппарата. Выполнение указанных требований в основном обеспечивалось аэродинамической компоновкой и ее параметрами и в то же время определяло особые требования к аэродинамической компоновке. Особенно сильное влияние на выбор компоновки оказывают требования по обеспечению взлетно-посадочных характеристик и мореходности, как производной этих требований. Значительное влияние на компоновку оказывает необходимость реализации поддува струй с целью увеличения динамической воздушной подушки под экранопланом. Применение поддува под крыло на старте приводит к улучшению взлетных характеристик, в крейсерском полете – позволяет уменьшить интенсивность вертикальных продольных и поперечных колебаний экраноплана, вероятность заливания и забрызги-

вания остекления, воздухозаборников и других элементов экраноплана. Также снижаются гидродинамические нагрузки на аппарат на взлетно-посадочных режимах и в полете.

Решение указанных противоречивых задач, как правило, предполагает использование экраноплана в достаточно узком эксплуатационном диапазоне высот (отстояний) и скоростей полета, что в определенной степени снижает их эксплуатационные качества. Снижаются возможности выполнения маневров в вертикальной и горизонтальной плоскостях и пространственных разворотов (разворотов с реализацией «значимых» углов крена).

Узкий диапазон эксплуатационных скоростей полета, при которых выполняются требования по обеспечению достаточной величины подъемной силы для горизонтального полета, устойчивости и управляемости экраноплана создает несколько проблем. Во-первых, относительно высокая скорость крейсерского движения, на которой обеспечивается достаточная для полета подъемная сила, требует реализации достаточно высоких скоростей на взлете. Во-вторых, необходимость полета с достаточно высокой транспортной скоростью определяется задачей обеспечения конкурентной транспортной эффективности. В то же время, необходимость полета с малой скоростью определяется, например, задачей обеспечения требуемой условиями полета маневренности в горизонтальной плоскости (по курсу) или возможности экстренного торможения. В-третьих, невозможность полета экраноплана с относительно малой скоростью горизонтального полета приводит к переходу на режим посадки на высоких скоростях полета. Под режимом посадки понимаем перевод функции по созданию поддерживающей силы с аэродинамических поверхностей на динамическую и статическую (последовательно) воздушную подушку и касание водной (снежной и т.п.) поверхности. Указанные негативные факторы потенциально могут привести к росту массы экраноплана, дополнительным энергетическим потерям на



создание воздушной подушки и в целом снижают безопасность экраноплана как транспортного средства. В-четвертых, реализация поддува практически во всех обозначенных компоновках требует применения специальных двигателей, расположенных в носовой части фюзеляжа, или значительного выноса вперед по полету относительно несущих поверхностей движителей (воздушных винтов). Этим значительно увеличивается относительная масса и сложность силовой установки и конструкции планера, возрастают эксплуатационные расходы.

Объект исследования

Предлагается компоновка (несущая система экраноплана), включающая две несущие поверхности (крылья), расположенные друг за другом по схеме «тандем», и высоко расположенное горизонтальное оперение (рис. 1). Переднее крыло стреловидное по передней кромке (трапецевидное), плоское, с относительно тонким профилем, имеет малый установочный угол по отношению к продольной оси. Заднее крыло прямое по передней кромке с обратной стреловидностью по задней кромке, имеет значительный установочный угол, отрицательное поперечное V крыла. Заднее крыло представляет собой крыло «шатрового» типа – задняя кромка крыла лежит в одной плоскости. Переднее и заднее крылья оснащены рулевыми поверхностями по задней кромке, которые могут отклоняться синхронно вниз-вверх и дифференциально (в режиме элеронов). Горизонтальное оперение оснащено рулем высоты.

Использование крыльев специальной формы с относительно большим углом установки позволяет реализовать высокие коэффициенты подъемной силы при малых углах атаки аппарата в целом. Кроме этого, положительная интерференция крыльев позволяет обеспечить безотрывное обтекание крыльев в эксплуатационном диапазоне режимов полета, является дополнительным фактором увеличения несущих способностей крыльев, позволяет обеспе-

Предлагается подойти к вопросу проектирования экраноплана не с точки зрения приоритетной задачи обеспечения высокого аэродинамического качества, а с точки зрения реализации высоких несущих свойств экранопланом при относительно малых скоростях полета. Под высокими несущими свойствами понимается возможность реализации высоких коэффициентов подъемной силы при малых углах атаки компоновки. Кроме этого, компоновка должна обеспечивать создание эффективной динамической воздушной подушки.

чивает целый ряд положительных эффектов при отклонении рулевых поверхностей. Важным является возможность организации поддува под заднее крыло на всех режимах полета (взлет, посадка, полет по маршруту) штатной силовой установкой. При этом обеспечивается высокая эффективность воздушной подушки и существует возможность управления ее параметрами. На рис. 1 *b* представлена расчетная модель одного из вариантов компоновки (беспилотной экспериментальной модели экраноплана).

Компоновка и ее параметры являются результатом длительных исследований (С.М. Кривель). Исследования на основе вычислительного эксперимента проводились с использованием метода дискретных вихрей всего спектра возможностей набора программных продуктов Ansys. Экспериментальные исследования выполнялись в аэродинамических трубах и вертикальной гидродинамической трубе. Общий обзор содержания некоторых исследований представлен в работе [10]. В источнике [11] показана необходимость реализации малых скоростей полета с точки зрения обеспечения маневренности экраноплана по курсу, представлены результаты расчета аэродинамических характеристик крыльев, расположенных по схеме «тандем». В работе [12] представлены основные результаты по оценке достоверности применения

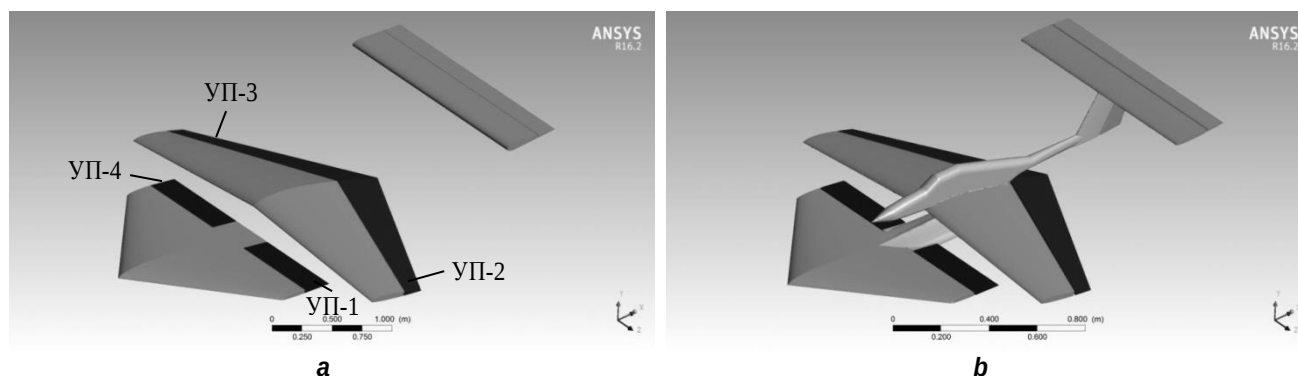


Рис. 1. Модель компоновки экраноплана: а – несущая система экраноплана; б – экспериментальная модель экраноплана

Fig. 1. WIG craft aerodynamic configuration:

a – WIG craft carrying system; b – experimental model of the WIG craft

Постановка задачи. Расчетная схема

продуктов Ansys для моделирования аэродинамических процессов вблизи подстилающей поверхности. В настоящей работе приводятся основные результаты исследований полной несущей системы экраноплана на основе описанной выше компоновки с учетом наличия горизонтального оперения и корпуса.

При анализе характеристик экраноплана используются общепринятые подходы, понятия и обозначения аэродинамики и динамики полета⁴ [13]. Рассматривается обтекание экраноплана с учетом или без учета фюзеляжа в скоростной $OX_aY_aZ_a$ и связанной $OXYZ$ системах координат (рис. 2). Начало координат совпадает с заданным положением центра масс. Характерный линейный размер – корневая хорда заднего крыла b_a . Характерная площадь – площадь двух крыльев в плане. Относительное отстояние компоновки от экрана определялось выражением:

$$\bar{h} = H/b_a,$$

где H – высота расположения центра масс (точки O) над подстилающей поверхностью (высота полета).

Формирование геометрической модели и построение расчетной сетки производилось в ANSYS IcemCFD. 3D модель исследуемой компоновки помещена в специально организованное ограниченное пространство моделирования течения в виде канала прямоугольного сечения – модель «аэродинамической трубы» (рис. 2).

Плоскости I и II представляют собой поверхности входа потока в расчетное пространство и выхода из него соответственно. В плоскости I задано граничное условие «inlet» – величина нормальной составляющей скорости потока по отношению к поверхности. Этим фактически задается расход рабочего тела (воздух) через сечение на входе в модель «трубы». Результаты расчетов сопоставлялись с данными экспериментальных исследований в аэродинамической трубе со скоростью невозмущенного потока 40 м/с. Такая же скорость задавалась в расчетах в качестве скорости в сечении I. Скорость соответствует постановке задачи исследования обтекания экраноплана на крейсерских и минимальных скоростях полета (без учета сжимаемости воздуха). На поверхности II задано граничное условие «outlet» – данная поверхность является выходом из аэроди-

⁴ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. Введ. 1981-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1981. 52 с. / GOST 20058-80. Dynamics of aircrafts in the atmosphere. Terms, definitions and symbols. Introduced 1 July 1981. Moscow: Standards Publ., 1981. 52 p.



намической трубы, на ней реализовано условие свободного выхода потока с расходом, равным общему расходу потока на всех входах в трубу (в данном случае через поверхность I).

В задачах симметричного моделирования экраноплана (углы скольжения β и крена γ равны нулю, компоновка экраноплана симметрична относительно плоскости III) целесообразно на поверхности III задавать граничное условие «зеркального» отображения картины обтекания. В этом случае моделируется течение только в окрестности половины компоновки с учетом влияния потока в «зеркально» отраженной части на уровне формирования уравнений течения рабочего тела. Если решается задача несимметричного обтекания, то моделируемое пространство увеличивается в два раза относительно оси OZ и все стенки «трубы» определяются условиями V.

На поверхностях IV (подстилающая поверхность) и V (стенки трубы) задано граничное условие «moving wall» – подвижная поверхность, скорость перемещения поверхности равна скорости потока на входе в трубу. Экраноплан совершает полет относительно неподвижной земной поверхности с заданной скоростью. Считаем, что скорость перемещения воздушных масс относительно земной поверхности (скорость ветра) равна нулю. Тогда с учетом обращения движения в рамках математической модели целесообразно задать стенки трубы подвижными по отношению к модели экраноплана с заданной невозмущенной скоростью обтекания. Особенно такой подход важен по отношению к поверхности

IV. В силу близости поверхностей экраноплана к этой границе, обусловленные вязкостью, эффекты течения вблизи подстилающей поверхности IV могут иметь серьезное значение на обтекание и, следовательно, аэродинамические характеристики экраноплана.

На поверхности экраноплана задано граничное условие «wall» – твердая непротекаемая поверхность, в качестве материала стенки задан алюминиевый сплав.

Сетка задана в виде конечных элементов (тетраэдров). Наименьший размер элементов сетки был задан на поверхности модели, относительные размеры элементов сетки на поверхности экраноплана не более 0,003 (рис. 3). Максимальное число конечных элементов сетки достигало около 5 миллионов.

Рабочее тело – воздух со стандартными параметрами. В качестве модели турбулентности была выбрана модель Realizable $k - \varepsilon$. Данная модель является улучшенной по отношению к модели Standart $k - \varepsilon$. Модель ориентирована на описание потоков с малым числом Рейнольдса. Предполагается, что поток турбулентный и вязкость играет малое влияние на течение. Выбор модели опирался на анализ факторов, определяющих обтекание компоновки в реальных условиях обтекания с учетом интерференции элементов компоновки и подстилающей поверхности, а также результаты аэродинамических исследований авторов с использованием различных моделей среды. Учитывались оценки и рекомендации разработчиков Ansys и ряда авторов [14, 15].

Аэродинамические характеристики компоновки

На рис. 4 демонстрируются основные аэродинамические характеристики компоновки без учета фюзеляжа (точка O – точка пересечения задней кромки второго крыла с плоскостью симметрии компоновки). Результаты расчетов приведены для относительного отстояния от экрана $\bar{h} = 0,1$. Коэффициент подъемной силы на малых углах атаки α обеспечивается угла-

ми установки переднего и заднего крыльев ($c_{y_a} = 0,67$). Значительный угол установки несущих поверхностей приводит к увеличению коэффициента лобового сопротивления c_{x_a} , что отрицательно сказывается на аэродинамическом качестве K (рис. 4).

На рис. 5 представлены зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки α в пределах предполагаемого



эксплуатационного диапазона $-2^\circ < \alpha < 4.5^\circ$ для различных отстояний $\bar{h}$. Наклон зависимости коэффициента подъемной силы c_{y_a} от угла атаки α имеет тенденцию к незначительному увеличению с уменьшением отстояния от экрана, а значение c_{y_a} при $\bar{h} = 1$, близко к результатам полета вне влияния экрана ($\bar{h} = \infty$). По мере прибли-

жения к поверхности экрана и с увеличением угла атаки возникает существенный момент на пикирование, особенно на малых отстояниях. Это происходит в результате того, что с уменьшением отстояния от экрана центр давления перемещается назад.

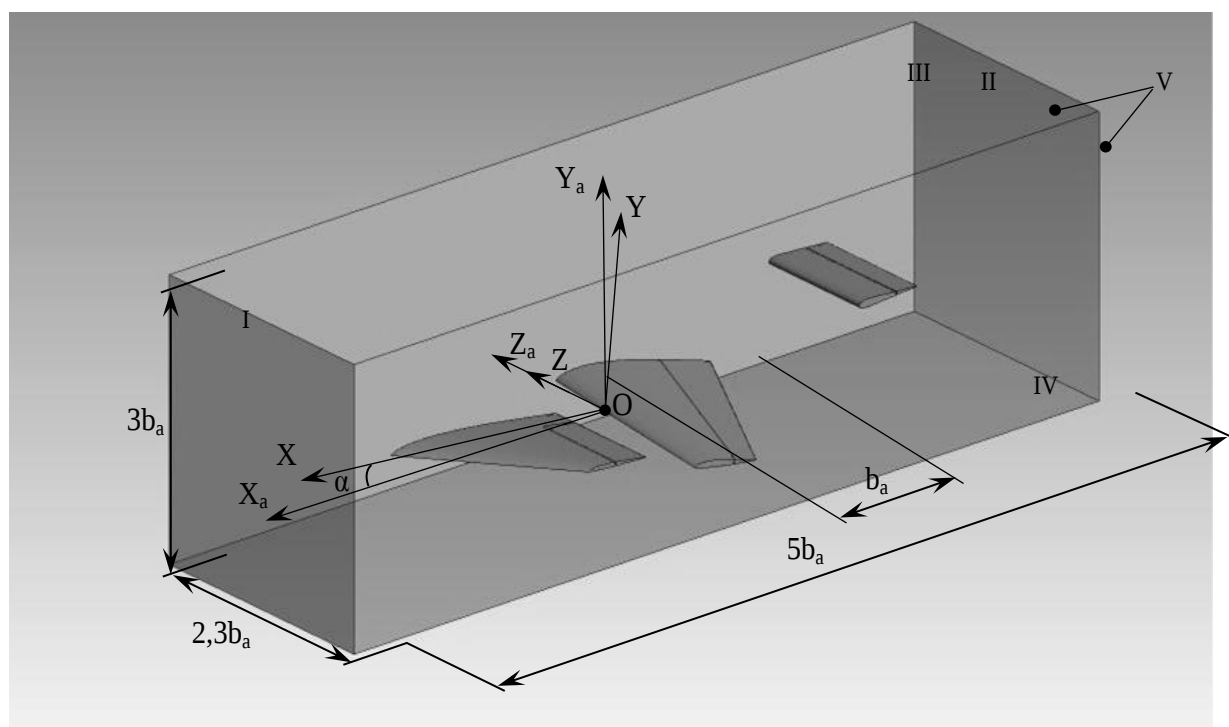


Рис. 2. Модель компоновки экраноплана в аэродинамической трубе
Fig. 2. Model of WIG craft aerodynamic configuration in the wind tunnel

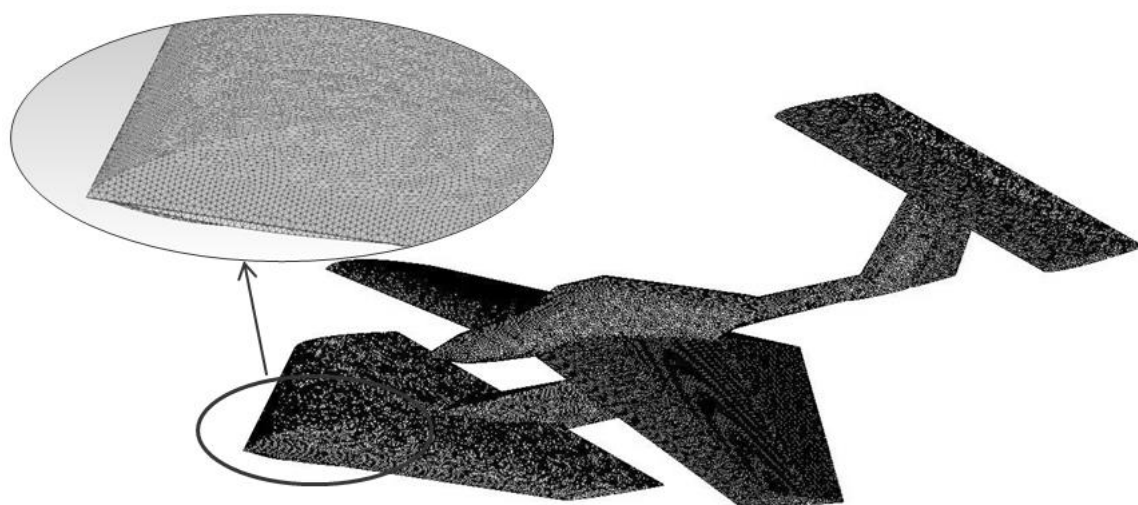


Рис. 3. Расчетная сетка экспериментальной модели экраноплана
Fig. 3. Computational mesh of the experimental model of the WIG craft

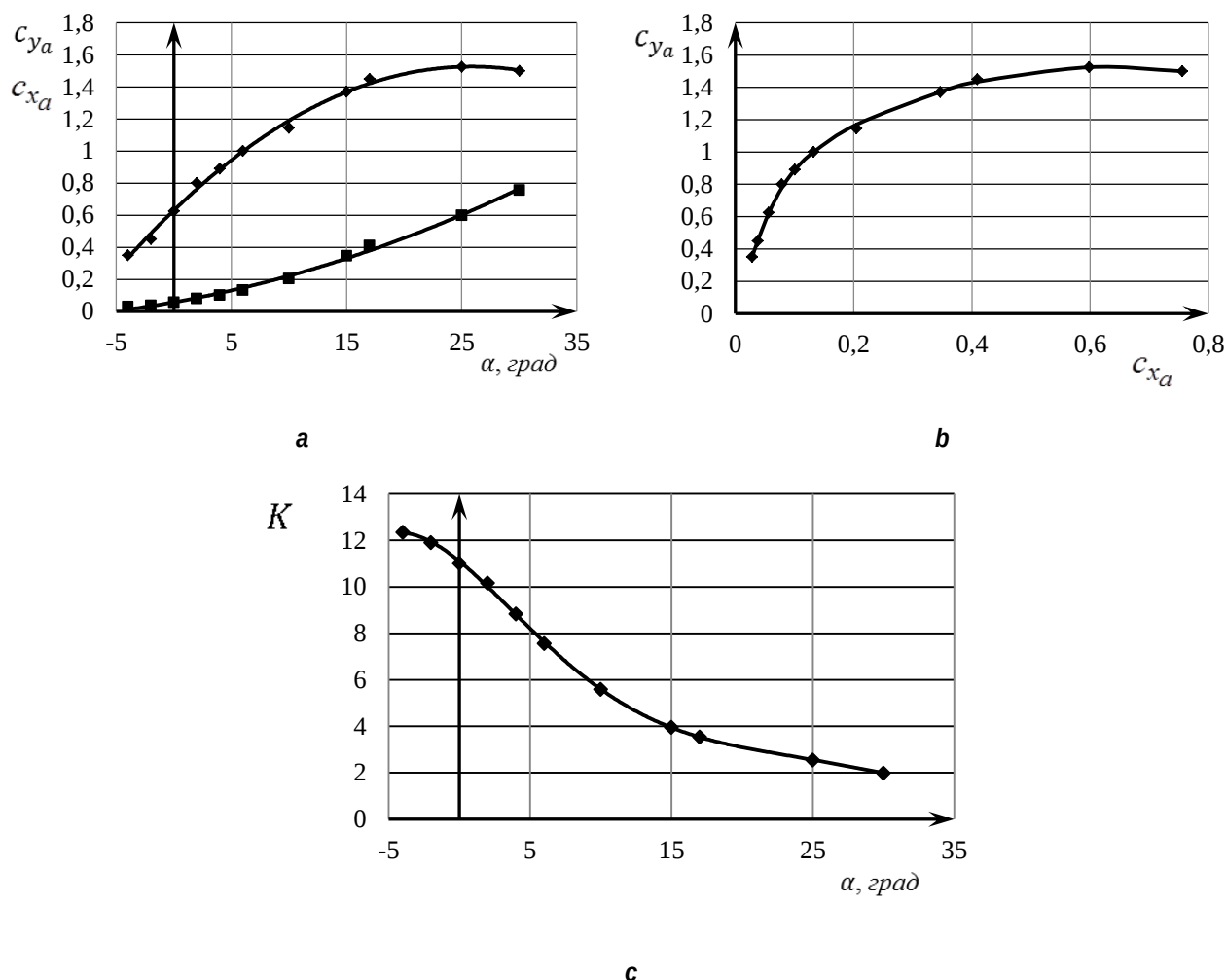


Рис. 4. Аэродинамические характеристики экраноплана без учета фюзеляжа:
a – зависимость коэффициентов подъемной силы c_{ya} и силы лобового сопротивления c_{xa} от угла атаки α ; **b** – поляра; **c** – зависимость аэродинамического качества K от угла атаки α

Fig. 4. Aerodynamic characteristics of the WIG craft ignoring fuselage:
a – dependence of the lift coefficients c_{ya} and the drag force c_{xa} on the angle of attack α ; **b** – polar; **c** – dependence of aerodynamic quality K on the angle of attack α

Несмотря на то, что предлагаемая несущая система экраноплана обладает небольшим аэродинамическим качеством, она может обеспечивать достаточно высокие несущие свойства за счет особенностей ее аэродинамики (рис. 6). Даже при незначительном угле атаки α на передней кромке первого крыла образуются два вихря. Вихри проходят над верхней поверхностью переднего крыла и под воздействием разряжения над передней кромкой заднего крыла и зоны повышенного давления под задним крылом смещаются на верхнюю по-

верхность заднего крыла. Вихри являются устойчивыми, так как их оси направлены под небольшим углом к вектору скорости обтекания компоновки. Наличие вихрей над верхней поверхностью несущих плоскостей создает дополнительное разрежение, которое улучшает несущие свойства компоновки и обеспечивает отсутствие дополнительных отрывов потока до, безусловно, значительных углов атаки α компоновки в целом. При этом на нижней поверхности несущих поверхностей создаются значительные зоны повышенного давления.

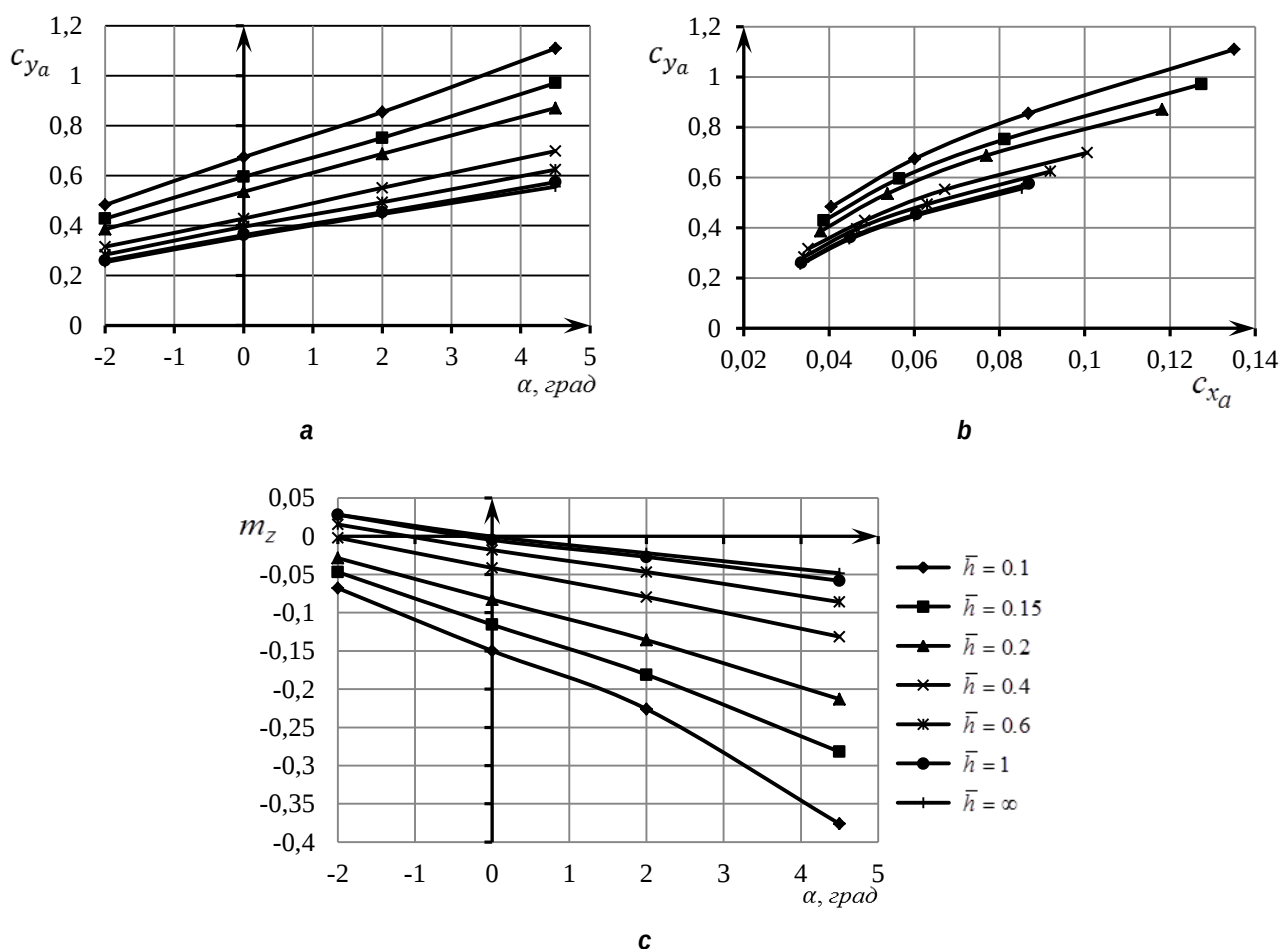


Рис. 5. Аэродинамические характеристики: а – зависимость коэффициента подъемной силы c_{ya} от угла атаки α при различных отстояниях от экрана $\bar{h}$; б – поляра компоновки при различных отстояниях от экрана $\bar{h}$; в – зависимость коэффициента продольного момента m_z от угла атаки α при различных отстояниях от экрана $\bar{h}$

Fig. 5. Aerodynamic characteristics: а – dependence of the lift coefficient c_{ya} on the angle of attack α at various distances from the screen $\bar{h}$; б – composition polar at different distances from the screen $\bar{h}$; в – dependence of the longitudinal moment coefficient m_z on the angle of attack α at various distances from the screen $\bar{h}$

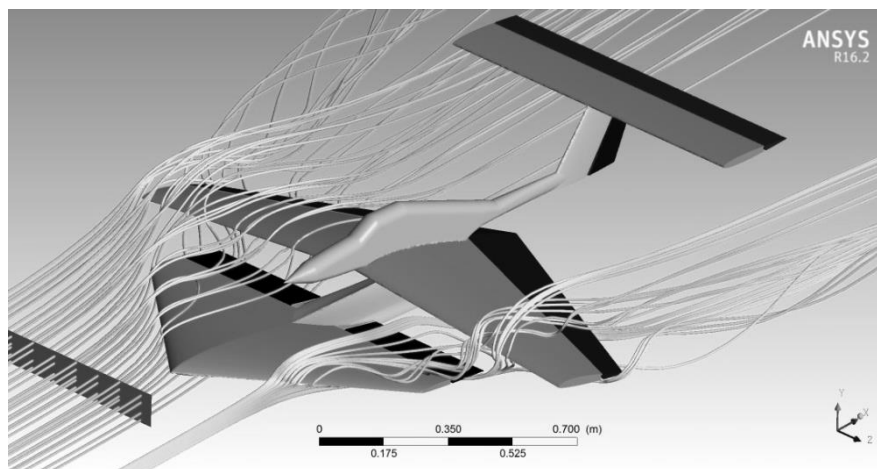


Рис. 6. Линии тока, образующиеся на переднем крыле
Fig. 6. Flow lines formed on the front wing



Проведена оценка возможности обеспечения управляемости компоновкой экраноплана и увеличения ее несущих свойств при помощи аэродинамических управляющих поверхностей с учетом всех возможных вариантов симметричного и несимметричного отклонения управляющих поверхностей переднего и заднего крыльев (рис. 1 а). Отклонение управляющих поверхностей задней кромкой вниз обозначается со знаком «-», вверх – со знаком «+».

Отклонение аэродинамических поверхностей УП -1, 4 и УП -2, 3 в режиме закрылков приводит к значительному приросту коэффициента подъемной силы (до величины прироста 53%). Наиболее эффективным является использование в режиме закрылков поверхностей только заднего крыла (УП -2, 4), так как в этом случае образуется существенная зона повышенного давления под обеими крыльями (рис. 7).

Таким образом, компоновка обеспечивает высокие значения коэффициента подъемной силы во всем эксплуатационном диапазоне углов атаки, что является положительным с точки зрения обеспечения широкого диапазона скоростей горизонтального полета.

В то же время компоновка демонстрирует высокую чувствительность и при-

емлемую реакцию на различные варианты отклонения управляющих поверхностей по изменению коэффициента продольного момента компоновки (рис. 7). Эти данные позволяют сделать вывод о широких возможностях реализации различных способов управления и балансировки компоновкой по высоте полета (отстоянию от экрана), углу тангажа.

Произведен анализ управляемости компоновки экраноплана на основе расчетов и зависимостей, изображенных на рис. 8 и 9. Как видно из графика (рис. 8), при любом варианте отклонения управляющих поверхностей с увеличением угла атаки α происходит увеличение коэффициента подъемной силы c_{y_a} . Коэффициент поперечного момента m_x (рис. 9) с увеличением угла атаки уменьшается, однако величина изменяется незначительно.

С точки зрения создания момента крена наиболее эффективными является отклонение управляющих поверхностей на углы (данные варианты отклонения обеспечивают наибольшую мощность управления):

1. $\delta_2 = -15^\circ, \delta_3 = 15^\circ$;
2. $\delta_1 = \delta_2 = -15^\circ, \delta_3 = 15^\circ$;
3. $\delta_1 = \delta_2 = -15^\circ, \delta_3 = \delta_4 = 15^\circ$.

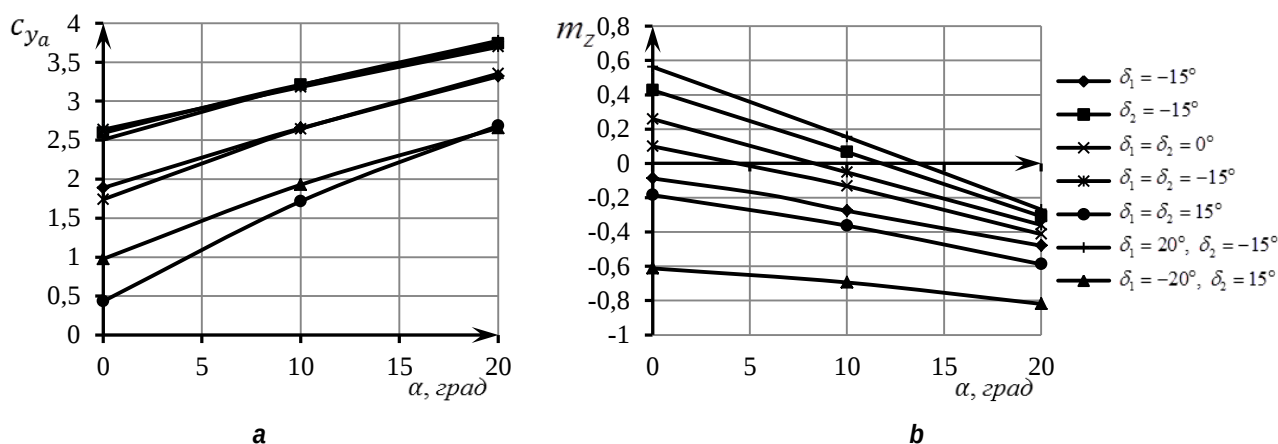


Рис. 7. Аэродинамические характеристики крыльев для различных вариантов отклонения управляющих поверхностей в режиме закрылков (характерная площадь – площадь переднего крыла): а – зависимость коэффициента подъемной силы c_{y_a} от угла атаки α ;

б – зависимость коэффициента продольного момента m_z от угла атаки α

Fig. 7. Aerodynamic characteristics of wings for various deflection variants of control surfaces in the flap mode (characteristic area – the area of the front wing): a – dependence of the lift coefficient c_{y_a} on the angle of attack α ; b – dependence of the longitudinal moment coefficient m_z on the angle of attack α

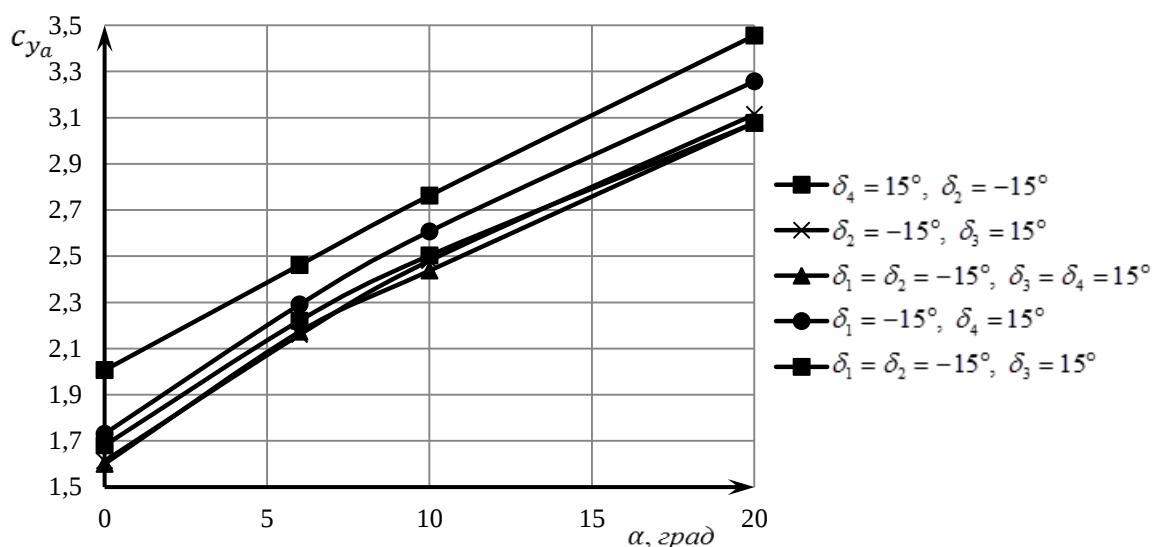


Рис. 8. Зависимость коэффициента подъемной силы c_{y_a} от угла атаки α для различных вариантов отклонения управляющих поверхностей в режиме элеронов (характерная площадь – площадь переднего крыла)

Fig. 8. Dependence of the lift coefficient c_{y_a} on the angle of attack α for various deflection variants of control surfaces in the aileron mode (characteristic area – the area of the front wing)

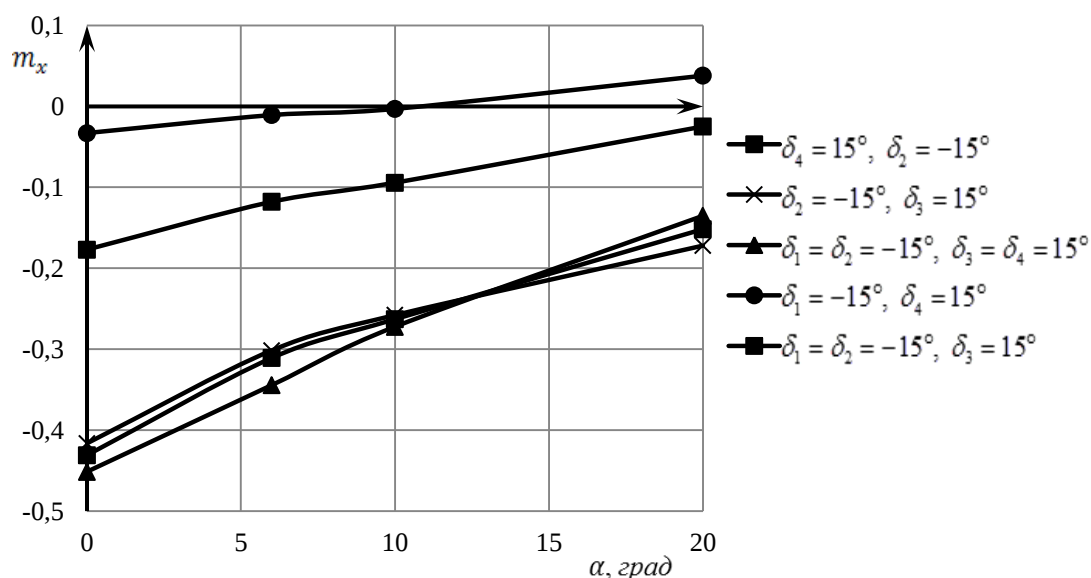


Рис. 9. Зависимость коэффициента поперечного момента m_x от угла атаки α для различных вариантов отклонения управляющих поверхностей в режиме элеронов (характерная площадь – площадь переднего крыла)

Fig. 9. Dependence of the rolling-moment coefficient m_x on the angle of attack α for various deflection variants of control surfaces in the aileron mode (characteristic area – the area of the front wing)

Как видно, управление коэффициентом поперечного момента также является многовариантным, одного и того же эффекта можно достичь разными способами управления, сохранив при этом приемле-

мый коэффициент подъемной силы c_{y_a} . Этот факт позволяет выбрать наиболее оптимальный вариант управления с точки зрения его технической реализуемости и целесообразности.



На рис. 10 изображены результаты расчета коэффициента подъемной силы компоновки c_{ya} в зависимости от угла атаки α для различных углов крена γ . Под углом крена γ понимается угол между плоскостью симметрии экраноплана и вертикальной по отношению к подстилающей поверхности плоскости. Вертикальная плоскость проходит через продольную ось экраноплана.

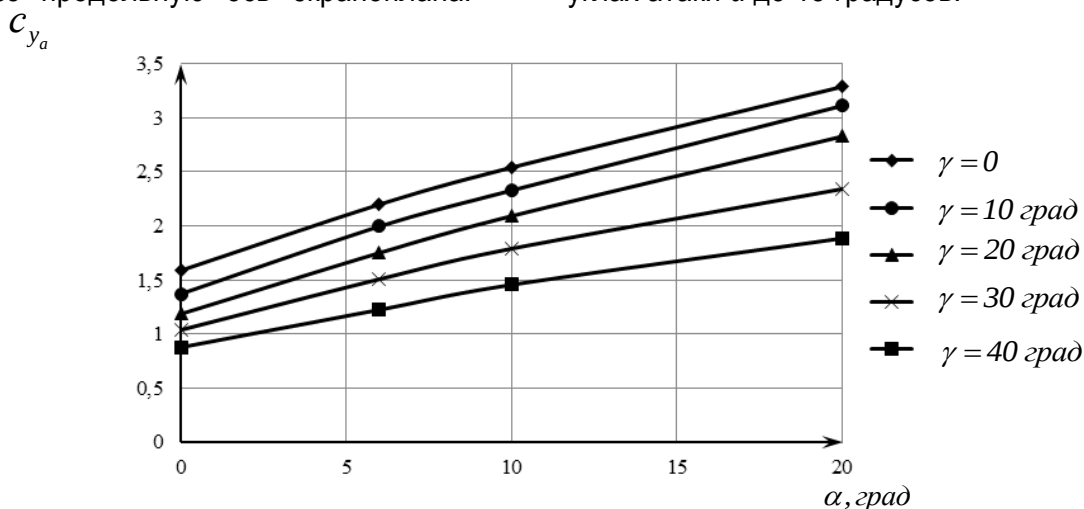


Рис. 10. Зависимость коэффициента подъемной силы c_{ya} от угла атаки α и угла крена γ (характерная площадь – площадь переднего крыла)
Fig. 10. Dependence of the lift coefficient c_{ya} on the angle of attack α and the bank angle γ (characteristic area – the area of the front wing)

Исследованы аэродинамические характеристики экраноплана с корпусом (экспериментальной модели экраноплана). Результаты сравнительного эксперимента показали, что использование корпуса в компоновке экраноплана незначительно снизило его несущие свойства. В среднем от-

клонение значений составило около 2%, однако в непосредственной близости от экрана за счет влияния фюзеляжа значения коэффициента подъемной силы уменьшились в среднем на 5% (рис. 11, 12). Данный факт позволяет сделать вывод

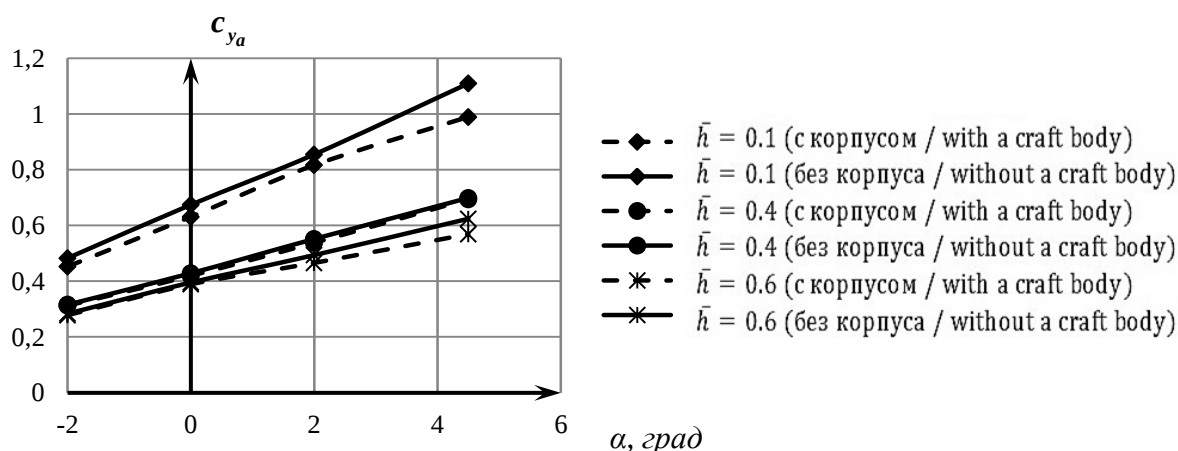


Рис. 11. Коэффициент подъемной силы c_{ya} для компоновки с фюзеляжем
Fig. 11. Lift coefficient c_{ya} for aerodynamic configuration with a fuselage

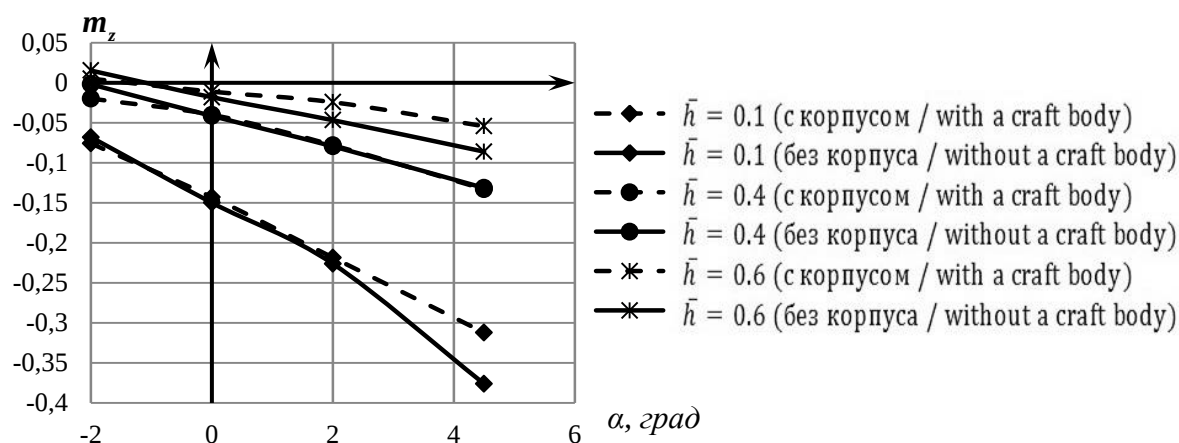


Рис. 12. Коэффициент продольного момента m_z для компоновки с фюзеляжем
Fig. 12. Coefficient of longitudinal moment m_z for aerodynamic configuration with fuselage

о том, что дальнейшие исследования компоновки возможно производить без учета фюзеляжа. Это позволит ускорить время

выполнения расчетов и при этом обеспечит приемлемую точность получаемых результатов.

Заключение

Использование двух несущих крыльев, расположенных по схеме «тандем», в компоновке позволяет реализовать на ней несколько управляющих поверхностей в виде механизации задних кромок (например, четыре управляющие поверхности), в отличие от компоновок с одним несущим крылом. Этим расширяются возможности непосредственного управления величиной подъемной силы, продольным и поперечным моментами компоновки.

Следует отметить, что предлагаемая компоновка обеспечивает значительный коэффициент подъемной силы $c_{y\alpha}$ уже на нулевом угле атаки α и, следовательно, позволяет реализовать более ранний взлет с поверхности, а также полет на малых скоростях с небольшими углами атаки α без применения механизации. Однако, в случае необходимости создания высоких несущих свойств (увеличения коэффициента подъемной силы $c_{y\alpha}$ без изменения угла атаки α) и достижения минимальных скоро-

стей полета, у компоновки предусмотрена развитая механизация, позволяющая повысить коэффициент подъемной силы $c_{y\alpha}$ более чем в полтора раза. Возможность сохранения стабильных аэродинамических характеристик компоновки в широком диапазоне углов атаки α позволяет существенно расширить эксплуатационный диапазон скоростей горизонтального полета. Использование поддува от винтов силовой установки безусловно позволит еще значительно уменьшить минимальные скорости полета.

Применение относительно больших установочных углов для крыльев приводит к снижению аэродинамического качества в области эксплуатационных углов атаки α экраноплана. Однако позволяет реализовать полет с незначительной скоростью и создать технические условия для организации высокоэффективного поддува под заднее крыло на основе штатной силовой установки.

Библиографический список

1. Белавин Н.И. Экранопланы. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: «Судостроение», 1977. 232 с.

2. Rozhdestvensky KV. Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect. Heidelberg: Springer,



2000. 352 p.

3. Пат. № 94009944, Российская Федерация, МПК В64С 39/00. Летательный транспортный аппарат – экраноплан / Б.С. Берковский; заявитель Научно-исследовательский центр БСБ. № 94009944/11; заявл. 22.03.1994; опубл. 29.08.2017, Бюл. № 25. 4 с.
4. Панченков А.Н., Драчев П.Т., Любимов В.И. Экспертиза экранопланов. Н.Новгород: Типография «Поволжье», 2006. 656 с.
5. Пат. № 144538, Российская Федерация, Экраноплан / Н.Ф. Герасимиди; заявитель и патентообладатель Н.Ф. Герасимиди. № 2014102397/11; заявл. 24.01.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. 2 с.
6. Иродов Р.Д. Критерии продольной устойчивости экраноплана // Ученые записки ЦАГИ. 1970. Т. 1. № 4. С. 63–72.
7. Якубович Н.В. Самолеты Р.Л. Бартини. М.: «Русское авиационное общество» (РУСАВИА), 2006.
8. Пат. № 2629463, Российская Федерация, МПК В60V 1/08, В60V 1/18. Экраноплан интегральной аэрогидродинамической компоновки / В.В. Колганов; заявитель и патентообладатель В.В. Колганов. № 2016145256; заявл. 18.11.2016; опубл. 29.08.2017, Бюл. № 25. 4 с.
9. Пат. № 2432275, Российская Федерация, МПК В60V 1/08. Экраноплан / О.А. Волик, С.В. Метелица; патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. № 2010116272/11; заявл. 26.04.2010; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30. 14 с.
10. Братусь С.Ю., Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Гусев И.Н., Кривель С.М. Аэродинамические особен-

ности и характеристики компоновок экраноплана схем «утка» и «тандем» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 5. С. 168–180.

11. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Концепция и результаты аэродинамического проектирования экраноплана с широким диапазоном эксплуатационных углов атаки // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык» (МИАЖ «Crede Experto»). 2015, № 1(03). [Электронный ресурс]. URL: <http://ce.if-mstuca.ru/index.php/issue2015-1> (14.12.2017).
12. Галушко Е.А. Комплексная оценка достоверности расчета аэродинамических характеристик сложных объектов с использованием ANSYS / Ю.Ф. Вшивков, Е.А. Галушко, С.М. Кривель // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык» (МИАЖ «Crede Experto»)/ № 1 (03). Март 2015 [Электронный ресурс]. URL: <http://ce.if-mstuca.ru/index.php/issue2015-1> (14.12.2017).
13. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолета. Пространственное движение. М.: Машиностроение, 1983. 320 с.
14. Wilcox, D.C. Turbulence Modeling for CFD / D.C. Wilcox – La Canada, California: DCW Industries Ins., 1998. 477 p.
15. Тарасов А.Л. Исследование аэродинамических характеристик профиля крыла вблизи поверхности земли с помощью программного комплекса ANSYS FLUENT // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 216. С. 135–140.

References

1. Belavin N.I. *Ekranoplany* [Ground effect crafts]. Leningrad: «Sudostroenie» Publ., 1977, 232 p. (In Russian).
2. Rozhdestvensky K.V. Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect. Heidelberg: Springer, 2000, p. 352.
3. Berkovsky B.S. *Letatel'nyj transportnyj apparat – jekranoplan* [The airborne transport vehicle – Wing-in-Ground effect vehicle] Application for invention. Patent RF, no. 94009944, 2017.
4. Panchenkov A.N., Drachev P.T., Lyubimov V.I. *Ekspertiza ekranoplanov* [WIG craft examination]. Nizhniy Novgorod: «Volga Region» Publ., 2006, 656 p. (In Russian).
5. Gerasimidi N.F. *Ekranoplan* [Wing-in-Ground effect vehicle]. Patent RF, no. 144538, 2014.
6. Irodov R.D. Criteria of the longitudinal stability of the WIG craft. *Uchenye zapiski* [TsAGI Proceedings], 1970, vol. 1, no. 4 (In Russian).
7. Yakubovich N.V. *Samolety R.L. Bartini* [R.L. Bartini's aircrafts]. Moscow: «Russian Aviation Society» (RUSA-VIA), 2006. (In Russian).
8. Kolganov V.V. *Ekranoplan integral'noy aerogidro-*

dinamicheskoy komponovki [Ground effect craft of the integral aerohydrodynamic configuration]. Patent RF, no. 2629463, 2017.

9. Volik O.A., Metelitsa S.V. *Ekranoplan* [Ground effect vehicle], Patent RF, no. 2432275, 2011.
10. Bratus S.Yu. Aerodynamic features and characteristics of GEV configurations of «duck» and «tandem» schemes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 5, pp. 168–180 (In Russian).
11. Vshivkov Ju.F., Galushko E.A., Krivel' S.M. The concept and results of aerodynamic design of the WIG craft with a wide range of operational angles of attack. *Mezhdunarodnyy informatsionno-analiticheskiy zhurnal «Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovaniye, yazyk»* [International information analytical journal «Credo Experto: transport, society, education, language»]. Available at: <http://ce.if-mstuca.ru/index.php/issue2015-1> (assessed 14 December 2017)
12. Galushko E.A. *Kompleksnaya otsenka dostovernosti raschota aerodinamicheskikh kharakteristik slozhnykh ob'yektov s ispol'zovaniyem ANSYS* [Com-



plex estimation of the computation reliability of aerodynamic characteristics of complex objects using ANSYS]. *Mezhdunarodnyy informatsionno-analiticheskiy zhurnal «Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovaniye, yazyk»* [International information analytical journal "Credo Experto: transport, society, education, language"]. Available at: <http://ce.if-mstuca.ru/index.php/issue2015-1> (assessed 14 December 2017)

13. Byshgens G.S., Studnev R.V. *Dinamika samoleta*.

Prostranstvennoye dvizheniye [Aircraft dynamics. Spatial motion]. Moscow: Matire building Publ., 1983, 320 p.
14. Wilcox, D.C. *Turbulence Modeling for CFD* / D.C. Wilcox – La Canada, California: DCW Industries Ins., 1998, 477 p.

15. Tarasov A.L. Research of the wing in ground effect of aerodynamics profile with software ANSYS FLUENT. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2015, no. 216, pp. 135–140.

Критерии авторства

Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Krivel S.M. 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.



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ И ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ К ЦЕНТРАМ МАССОВОГО ТЯГОТЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СУПЕРМАРКЕТОВ г. ИРКУТСКА

© А.О. Казимиров¹, Д.Г. Бурков²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Среди множества объектов торговли, расположенных в городах и на субурбанизированных территориях, наиболее проблемными с точки зрения транспортной загруженности на сегодняшний день являются супермаркеты, поскольку они генерируют значительные транспортные и пешеходные потоки по сравнению с потоками к таким объектам тяготения как: аптеки, специализированные магазины, офисы, а также службы сервиса. Супермаркеты обладают стабильно высоким спросом благодаря двум неоспоримым факторам – доступность и широчайший ассортимент. Таким образом, супермаркеты генерируют значительные потоки посетителей, из-за чего пропускная способность прилегающей улично-дорожной сети (УДС), а также емкость близлежащих парковок стремительно исчерпывается. В связи с вышеупомянутыми фактами, целью исследования становится выявление суточной генерации передвижений, а также сопутствующих характеристик функционирования объектов тяготения, отражающих способ передвижения, наполнение автомобилей, пиковую активность прибытия посетителей, число припаркованных автотранспортных средств на примере супермаркетов г. Иркутска. **МЕТОДЫ.** Особенность исследования заключалась в обследовании супермаркетов в течение суточного периода функционирования, причем территориальное позиционирование супермаркетов, расположение относительно магистральной улицы и центра города, их площадь и наличие парковочных мест рознились. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Оценка транспортного спроса к данным объектам торговой направленности показала, что наибольшее влияние на число корреспонденций имеют удаленность от магистральной улицы, центра города, а также наличие парковочных мест. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Из полученных данных было установлено, что для рассматриваемых супермаркетов основной пик активности по прибытии посетителей лежит в интервале с 15:00 до 20:00, после 20:00 число посетителей пошло на спад.

Ключевые слова: удельная генерация корреспонденций, супермаркет, оценка транспортного спроса, пере-профилирование и точечная застройка территории, количественные характеристики городской территории, парковочные места.

Информация о статье. Дата поступления 25 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 06 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Казимиров А.О. Бурков Д.Г., Прогнозирование интенсивности транспортных и пешеходных потоков к центрам массового тяготения на примере супермаркетов г. Иркутска // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 207–214. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-209-216

FORECASTING INTENSITY OF TRAFFIC AND PEDESTRIAN FLOWS TO THE CENTERS OF MASS ATTRACTION ON EXAMPLE OF SUPERMARKETS IN IRKUTSK

A.O. Kazimirov, D.G. Burkov

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

ABSTRACT. PURPOSE. Among many retail facilities located in cities and suburbanized territories supermarkets are the most problematic objects today in terms of transport load as transport and pedestrian flows they generate are larger than those to pharmacies, specialized stores, offices and services. Two indisputable factors including availability and the widest range determine persistently high demand of supermarkets. Therefore, significant visitor flows supermarkets generate rapidly bring the capacity of the adjacent road network and nearby parking lots to the end of their resources. The facts above determine the purpose of research, which is to identify the daily trip generation, as well as the associated characteristics of the operation of the objects of attraction reflecting the mode of movement, vehicle occupancy, peak activity of visitor arrival, number of parked vehicles on an example of the supermarkets in the city of Irkutsk. **METHODS.** The feature of the study is the survey of supermarkets under investigation during the daily period of their operation. It should be noted that their location, distance from the main street and the city center, their area and availability of parking

¹Казимиров Александр Олегович, студент, e-mail: alexandr.kazimirov@tl-istu.com

Aleksandr O. Kazimirov, Student, e-mail: alexandr.kazimirov@tl-istu.com

²Бурков Дмитрий Германович, аспирант, e-mail: dimichherman@mail.ru

Dmitry G. Burkov, Postgraduate student, e-mail: dimichherman@mail.ru



spaces were different. **RESULTS.** The estimation of transport demand to these retail facilities showed that remoteness from the main street and city center as well as the availability of parking spaces have the greatest influence on the number of correspondences. **CONCLUSION.** Having processed the obtained data, it was found that the main activity peak for the supermarkets in question falls upon the arrival of visitors within the interval from 3:00 pm to 8:00 pm. After 8:00 pm the number of visitors turns down.

Keywords: *specific trip generation, supermarket, estimation of transport demand, re-profiling and spot development of the territory, quantitative characteristics of the city territory, parking spaces.*

Article info. Received December 25, 2017; accepted February 06, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Kazimirov A.O., Burkov D.G. Forecasting intensity of traffic and pedestrian flows to the centers of mass attraction on example of supermarkets in Irkutsk. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 207–214. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-209-216

Введение

Повышение качества обслуживания городского населения является одной из первостепенных задач, стоящих перед транспортным инженером. Решение поставленной задачи связано с проблемами создания городов и субураанизированных территорий, удобных для жизни. Одной из таких проблем является оценка транспортного спроса к объектам торговли, поскольку доля передвижений к таким объектам в большой мере влияет на загруженность дорожной сети города [1, 2]. Супермаркеты обладают стабильно высоким спросом благодаря двум неоспоримым факторам – доступность и широчайший ассортимент. Таким образом, супермаркеты генерируют значительные потоки посетителей, из-за

чего пропускная способность прилегающей улично-дорожной сети (УДС), а также емкость близлежащих парковок стремительно исчерпывается [3, 4].

Как показывает статистика, если расположение супермаркета превышает по доступности от жилья 10 минут, то большинство потребителей воспользуются ближайшим магазином. Поэтому к территории супермаркета предъявляются следующие требования:

- наличие подъездных путей и парковки;
- место должно быть проходимым, желательно, чтобы рядом проходили дороги и трассы или пешеходные дорожки от остановки к «жилому массиву»^{3,4}.

Оценка транспортного спроса

Оценка транспортного спроса проводилась по двум супермаркетам г. Иркутска. Объекты для исследования выбирались по следующим принципам, способствующим повышению точности и снижению трудоемкости замеров:

- территория должна быть монофункциональна;

- через территорию не должны проходить сквозные проезды;

- объект должен быть в эксплуатации не менее двух лет⁵.

Супермаркет «SPAR» (рис. 1) имеет площадь 1550 м². На прилегающей территории 20 парковочных мест. Исследования проводились в будний день с 8:00 до 23:00.

³СНиП 2.05.02-85 Автомобильные дороги / Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 56 с. / SNiP 2.05.02-85 Automobile Roads / Gosstroy of the USSR. Moscow: Central Institute of Standardized Design. Gosstroy USSR, 1986. 56 p.

⁴Руководство по проведению транспортных обследований в городах / Белорусский гос. науч.-иссл. и проектный ин-т градостроительства. М.: Стройиздат, 1982. 72 с. / A guide for conducting transport surveys in cities / Belorussian state. Scientific Research and Design Institute of Urban Development. Moscow: Stroiizdat, 1982. 72 p.

⁵Руководство по проведению транспортных обследований в городах. М.: Стройиздат, 1982. 72 с. / Guide for conducting transport surveys in cities. Moscow: Stroiizdat, 1982. 72 p.

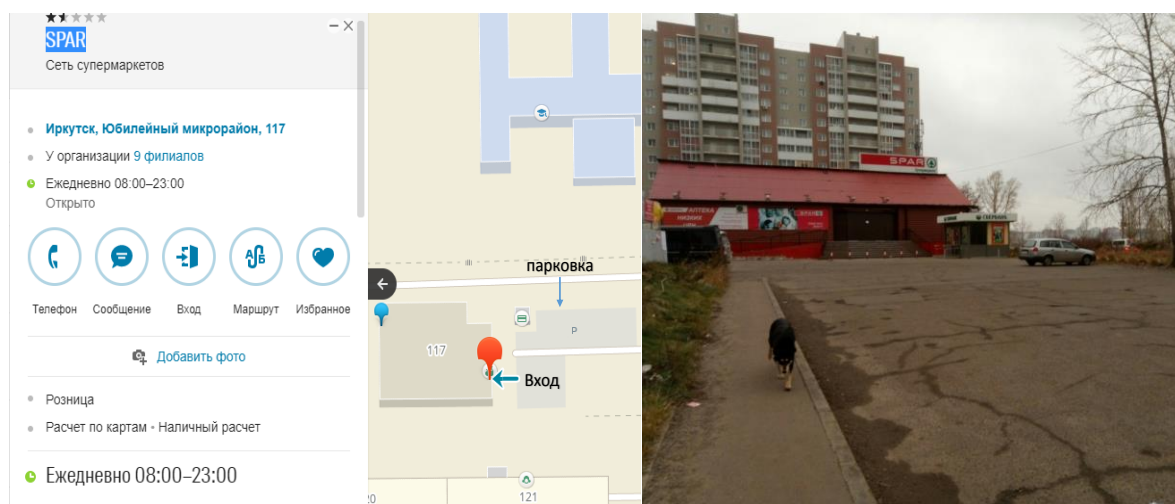


Рис. 1. Расположение и режим работы супермаркета «SPAR»
Fig. 1. Location and working hours of the supermarket «SPAR»

Следует отметить, что вблизи рассматриваемого супермаркета расположена средняя общеобразовательная школа № 18, а также жилая зона.

Общая площадь супермаркета «Свой» составляет 1400 м². Исследование данного супермаркета проводилось в будний день с 8:00 до 23:00.

В отличие от супермаркета «Свой», супермаркет «SPAR» располагается в спальном районе, значительно удаленном от центра города, характеризуется плотной застройкой. Доля жилой застройки, а также ее этажность значительно выше, чем в районе, на территории которого располагается супермаркет «Свой». Для обследо-

вания были выбраны именно эти два объекта, которые имеют значительные несхожести по характеристике их территориального позиционирования⁵ [5] (табл. 1).

Как видно из табл. 1, супермаркеты достаточно существенно различаются по удаленности от центра города и от магистральной улицы. Режим рассматриваемых супермаркетов лежит в одном интервале – с 8:00 до 23:00 ч. Натурные исследования проводились в будние дни. Для оценки транспортного спроса необходимо было выявить основные количественные характеристики функционирования данных объектов за их суточный период работы.

Таблица 1

Территориальная характеристика исследуемых объектов

Table 1

Territorial characteristics of the facility under investigation

Наименование объекта / Facility name	Удаленность от центра города, м / Distance from the city center, m	Удаленность от магистральной улицы, м / Distance from the main street, m	Площадь объекта, м ² / Facility area, m ²
Супермаркет «SPAR» / Supermarket “SPAR”	7300	110	1550
Супермаркет «Свой» / Supermarket “Svoy”	3400	510	1400



Из полученных данных было установлено, что для супермаркета «SPAR» пик активности по прибытии посетителей лежит в интервале с 15:00 до 20:00. Межпиковым участком стало время с 10:00 до 15:00, после 20:00 число посетителей пошло на спад. В межпиковый период времени супермаркет преимущественно посещали люди пожилого возраста, школьники, а также студенты. С 9:00 до 10:00 наблюдался скачок посетителей, скорее всего это связано с тем, что возле супермаркета располагается городская больница. В момент пика больше всего людей прибыло в магазин пешком [6] (рис. 2).

Пик посетителей супермаркета

«Свой» лежит в интервале с 18:00 до 20:00, этот пик связан с возвращением занятого населения с мест приложения труда. Супермаркет «Свой» располагается достаточно удаленно от магистральной улицы, таким образом, исключается возможность интенсивного роста числа посетителей из-за отсутствия видимости магазина для потенциальных покупателей. Межпиковый период супермаркета «Свой» лежит в интервале с 13:00 до 17:00. Как видно из рис. 3, наблюдается небольшая активность посетителей с 8:00 до 10:00, связанная с тем, что магазин в основном посещают люди, которые проживают в непосредственной близости к нему⁶.

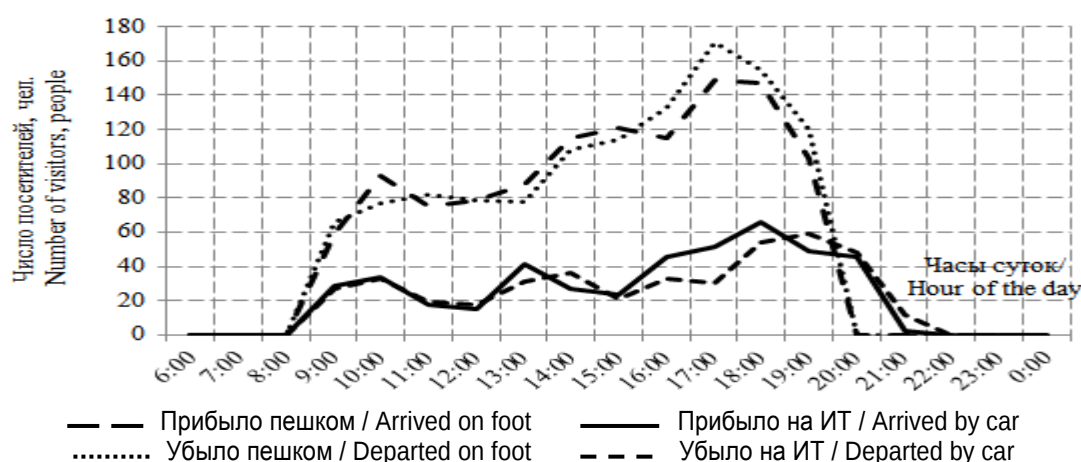


Рис. 2. Активность посетителей по прибытии в супермаркет «SPAR»

Fig. 2. Activity of visitors on arrival to the supermarket «SPAR»

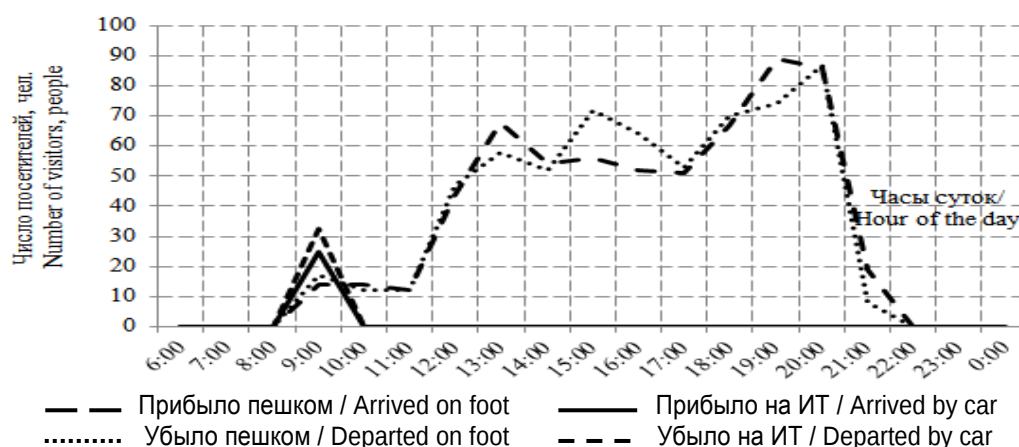


Рис. 3. Активность посетителей по прибытии в супермаркет «Свой»

Fig. 3. Activity of visitors on arrival to the supermarket «Svoy»

⁶ГОСТ Р 51773-2009. Услуги торговли. Классификация предприятий торговли. М.: Стандартинформ, 2010 / GOST R 51773-2009. Trade services. Classification of retail enterprises. M.: Standartinform, 2010



В то же время число посетителей и соотношение прибывающих на общественном (ОТ) и индивидуальном транспорте (ИТ) для рассматриваемых случаев рознятся. На рис. 4 мы видим график интенсивности прибытия на ИТ в супермаркет SPAR, который можно сравнить с графиком интенсивности прибытия на ИТ в супермаркет «Свой» (рис. 5). Разницу можно объяснить удаленностью от магистральной улицы. Чем ближе объект тяготения расположен к магистральной улице, тем больше посети-

телей, прибывающих на общественном транспорте или на индивидуальном транспорте, что проиллюстрировано в табл. 2.

На рис. 6 и 7 представлены данные коэффициента суточной неравномерности, из которого видно число посетителей по прибытии и убытию.

Из полученных данных о числе припаркованных автотранспортных средств (рис. 8) было установлено пиковое число автомобилей, что составило от 28 до 30 единиц в период времени с 17:50 по 20:00.

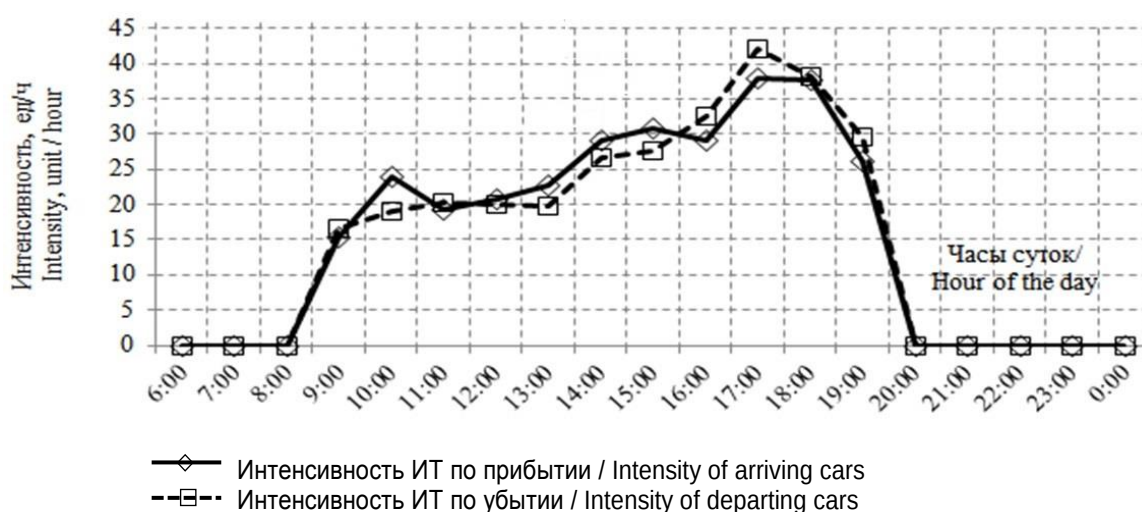


Рис. 4. Распределение посетителей, прибывающих на ИТ в супермаркет «SPAR»
Fig. 4. Distribution of visitors arriving by cars transport to the supermarket «SPAR»

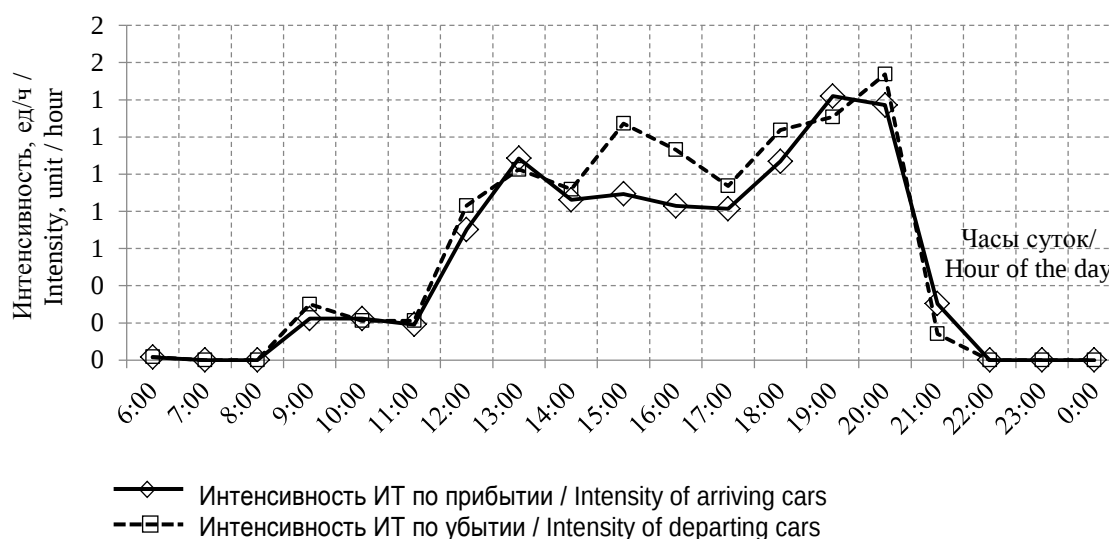


Рис. 5. Распределение посетителей, прибывающих на ИТ в супермаркет «Свой»
Fig. 5. Distribution of visitors arriving by cars transport to «Svoy» supermarket

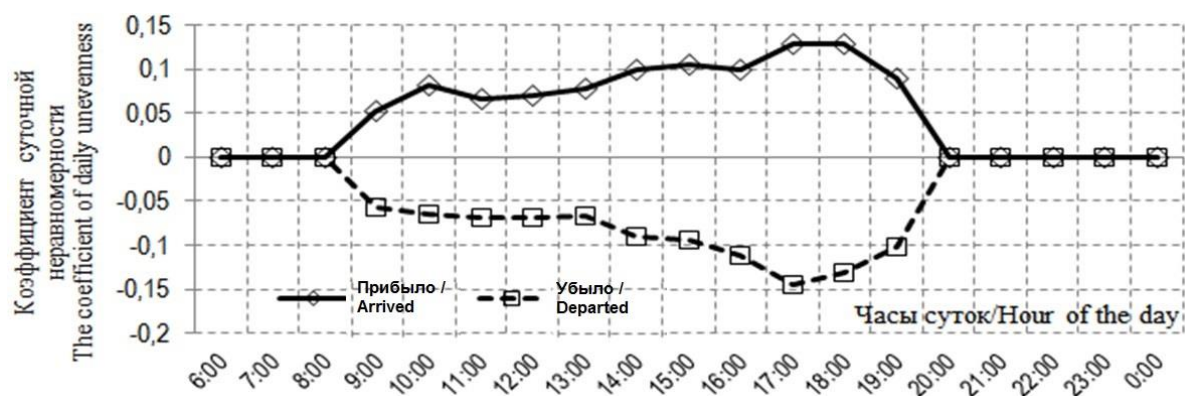


Рис. 6. Коэффициент суточной неравномерности супермаркета «SPAR»
Fig. 6. Coefficient of daily unevenness for «SPAR» supermarket

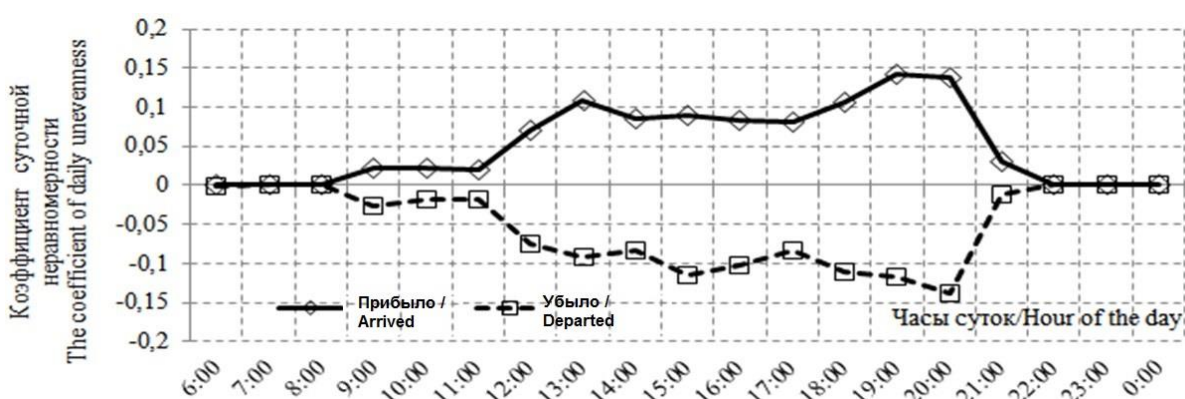


Рис. 7. Коэффициент суточной неравномерности супермаркета «Свой»
Fig. 7. Coefficient of daily unevenness for «Svoyn» supermarket

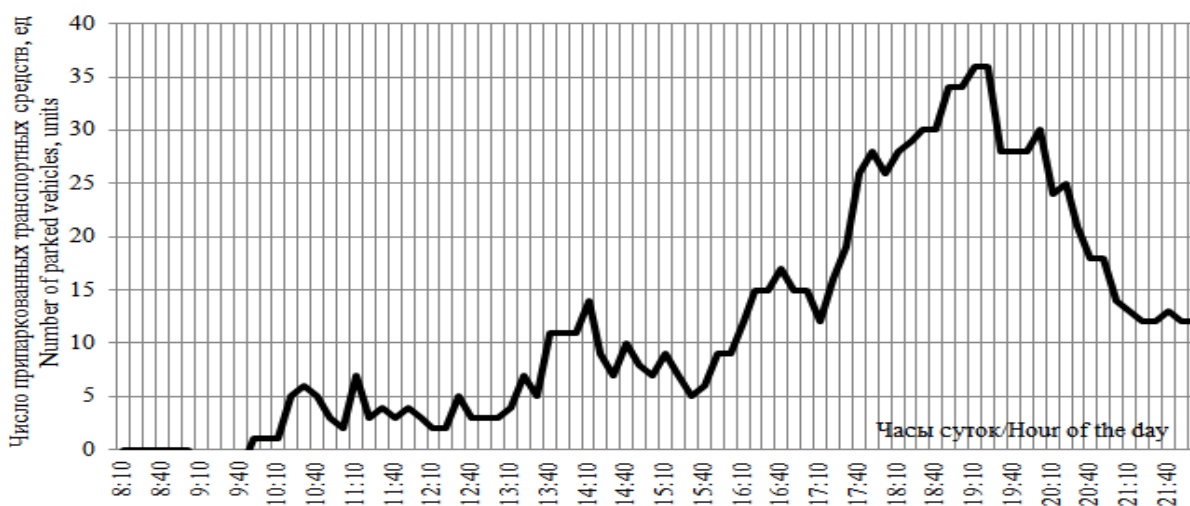


Рис. 8. Число припаркованных транспортных средств у супермаркета «SPAR»
Fig. 8. Number of vehicles parked at the supermarket «SPAR»

По графику «число припаркованных транспортных средств» (рис. 8) у супермаркета SPAR видно, что пиковое

количество автотранспортных средств доходит до 35 единиц.



Таблица 2

Удельная генерация корреспонденций к исследуемым объектам

Table 2

Specific trip generation to the facilities under investigation

Объекты / Facilities	Общая площадь / Total area	Генерация, ед./сут / Generation, units per day		Норматив / Standard		Инд. / Ind.	Пешком / On foot
–	–	Прибытие / Arrival		Кол-во м ² на 1 чело- век / Num- ber of m ² per 1 per- son	Кол-во че- ловек на 1 м ² / Num- ber of peo- ple per 1 m ²	–	–
		1144		–	–	–	–
		Индивиду- ально / Indi- vidually	Пешком / On foot	–	–	–	–
«SPAR»	1550	443	701	1,354	0,738	0,39	0,61
–	–	626		–	–	–	–
«Свой» «Svoy»	1400	16	610	2,236	0,447	0,03	0,97
–	–	1770		–	–	–	–

Заключение

Таким образом, по полученным данным можно сделать следующий вывод: удаленность от магистральной улицы как фактор территориального позиционирования оказывает значительное влияние на способ передвижения посетителей к объектам рассматриваемого типа. С ростом удаленности объекта от магистральной улицы доля посетителей на ИТ сокращается.

Сравнивая два объекта, супермаркет «SPAR» и супермаркет «Свой», можно увидеть, что у супермаркета «Свой» с удаленностью от магистральной улицы в 510 метров посетителей на ИТ составляет 3%, в то время как у супермаркета «SPAR» с удаленностью от магистральной улицы в 110 метров этот показатель равен 39%.

Библиографический список

1. Зедгенизов А.В., Зедгенизова А.Н., Левашев А.Г. Оценка объема генерации корреспонденций к супермаркету в выходные дни // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 78–83.
2. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов. М.: Транспорт, 1990. 240 с.
3. Trip Generation Handbook, a Proposed // Institute of Transportation Engineers (2014). Recommended Practice. Washington, DC.
4. Уманский А.А. Справочник проектировщика

- промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений (расчетно-теоретический). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1972. 609 с.
5. Лагерева Р.Ю., Зедгенизов А.В. Проблемы управления магистральными улицами в условиях плотного транспортного потока // Вестник ИРГТУ. 2011. № 1 (48). С. 109–113.
6. Белинский А.Ю. Закономерности подвижности и расселения жителей Таллина // Городской транспорт: сб. статей. М., 1969.



References

1. Zedgenizov A.V., Zedgenizova A.N., Levashev A.G. Evaluation of generation correspondence volume to a supermarket on weekdays *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the KSUAE], 2012, no. 2, pp. 78–83. (In Russian).
2. Lobanov E.M. *Transportnaja planirovka gorodov* [Transport planning of cities]. Moscow: Transport Publ., 1990, 240 p. (In Russian).
3. Trip Generation Handbook, a Proposed. Institute of Transportation Engineers (2014). Recommended Practice. Washington, DC.
4. Umanskij A.A. *Spravochnik proektirovshhika promyshlennyh, zhilyh i obshhestvennyh zdaniy i sooru-*

- zhenij (raschetno-teoreticheskij)* [Calculation and Theoretical Handbook of the Designer of Industrial, Residential and Public Buildings and Structures]. Moscow: Strojizdat Publ., 1972, 609 p. (In Russian).
5. Lagerev R.Ju., Zedgenizov A.V. The problem to control trunk roads under the dense traffic flow. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2011, no. 1 (48), pp. 109–113. (In Russian).
6. Belinskij A.Ju. *Zakonomernosti podvizhnosti i rasselenija zhitelej Tallina. Gorodskoj transport* [Regularities of Tallin residents mobility and settlement]. Moscow, 1969. (In Russian).

Критерии авторства

Казимиров А.О., Бурков Д.Г. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Kazimirov A.O., Burkov D.G. 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.



ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСТЯГИВАЮЩИХ УСИЛИЙ

© О.В. Мельниченко¹, А.Ю. Портной², В.М. Агафонов³, А.О. Линьков⁴,
С.Г. Шрамко⁵, Д.А. Яговкин⁶, Р.И. Устинов⁷

Иркутский государственный университет путей сообщения,

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Обеспечение сходимости математической модели рельсовых плетей и ее физической модели путем сравнения их амплитудно-частотных характеристик для исследования нового способа определения растягивающих усилий. **МЕТОДЫ.** Сравнение резонансных частот результатов физического и математического моделирования. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе сравнения результатов физического и математического моделирования получены значения отклонений резонансных частот для физических и математических моделей методом конечных элементов (МКЭ). **ВЫВОДЫ.** Полученная сходимость результатов физического и математического моделирования МКЭ рельсового пути позволит в дальнейшем исследовать новый способ определения растягивающих усилий.

Ключевые слова: железнодорожный путь, напряженное состояние, физическая модель, математическая модель, метод конечных элементов.

Информация о статье. Дата поступления 11 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 20 февраль 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраль 2018 г.

Формат цитирования: Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Агафонов В.М., Линьков А.О., Шрамко С.Г., Яговкин Д.А., Устинов Р.И. Оценка сходимости характеристик разработанных моделей рельсового пути для исследования нового способа определения растягивающих усилий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 215–227. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-217-229

¹Мельниченко Олег Валерьевич, доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Российской инженерной академии, заведующий кафедрой электроподвижного состава, e-mail: olegmelnval@mail.ru

Oleg V. Melnichenko, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Corresponding Member of the Russian Engineering Academy, Head of the Department of Electric Rolling Stock, e-mail: olegmelnval@mail.ru

²Портной Александр Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, механики и приборостроения, e-mail: portnoyirrit@yandex.ru

Alexander Yu. Portnoy, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, e-mail: portnoyirrit@yandex.ru

³Агафонов Владимир Михайлович, инженер кафедры физики, механики и приборостроения, e-mail: agafonov_vm@irgups.ru

Vladimir M. Agafonov, Engineer of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, e-mail: agafonov_vm@irgups.ru

⁴Линьков Алексей Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроподвижного состава, e-mail: linkovalex@mail.ru

Aleksey O. Linkov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, e-mail: linkovalex@mail.ru

⁵Шрамко Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, заведующий лабораториями кафедры электроподвижного состава, e-mail: novorossereg@mail.ru

Sergey G. Shramko, Candidate of technical sciences, Head of the Laboratories of the Department of Electric Rolling Stock, e-mail: novorossereg@mail.ru

⁶Яговкин Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроподвижного состава, e-mail: yadima11_06@mail.ru

Dmitry A. Yagovkin, Candidate of technical sciences, Senior lecturer of the Department of Electric Rolling Stock, e-mail: yadima11_06@mail.ru

⁷Устинов Роман Иванович, аспирант, учебный мастер кафедры электроподвижного состава, e-mail: romust93@mail.ru

Roman I. Ustinov, Postgraduate student, Training Master of the Department of Electric Rolling Stock, e-mail: romust93@mail.ru



EVALUATION OF DEVELOPED RAILROAD TRACK MODEL CHARACTERISTICS CONVERGENCE TO STUDY A NEW METHOD OF TENSILE FORCE DETERMINATION

O.V. Melnichenko, A. Yu. Portnoy, V. M. Agafonov, A.O. Linkov, S.G. Shramko, D.A. Yagovkin, R.I. Ustinov

Irkutsk State Transport University,

15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The **Purpose** of the study is to ensure the convergence of the rail bar mathematical model and its physical model through the comparison of their amplitude-frequency characteristics in order to study a new method of tensile stress determination. The **METHODS** used in the study include comparison of the resonant frequencies of the results of physical and mathematical modeling. **RESULTS.** Having compared the results of physical and mathematical modeling, we obtained the values of resonance frequency deviations for the physical and mathematical models by the finite element method (FEM). **CONCLUSIONS.** The obtained convergence of the results of physical and mathematical FEM simulation of the track will allow further researches of a new method of tensile stress determination.

Keywords: railway track, stress condition, physical model, mathematical model, finite element method (FEM).

Article info. Received December 11, 2017; accepted February 20, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Melnichenko O.V., Portnoy A.Yu., Agafonov V.M., Linkov A.O., Shramko S.G., Yagovkin D.A., Ustinov R.I. Evaluation of developed railroad track model characteristics convergence to study a new method of tensile force determination. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 215–227. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-217-229

Введение

В связи с увеличением грузопотока усложняются условия эксплуатации подвижного состава железных дорог. На сегодняшний день в Российской Федерации широко используется бесстыковой путь, состоящий из рельсовых плетей длиной в один километр и более. В то же время колебания температур от минус 50 °С до плюс 50 °С обуславливают температурные расширения и сжатия рельсового пути, при этом соответствующие сжатия и растяжения создают дополнительные напряжения в рельсах. Летом сжатия пути обуславливают возможность выдавливания пути, зимой растяжения – возможность практически мгновенных разрывов пути, что снижает

безопасность движения на российских железных дорогах, особенно для организации скоростного и тяжеловесного движения⁸ [1, 2].

Сжатия и растяжения рельсов, возникающие при укладке и закреплении плетей, требуют контроля их характеристик как после укладки, так и в период эксплуатации. Контролировать необходимо не только дефектоскопией на образование трещин в рельсах, но и вести контроль напряженного их состояния, т.к. изломы рельсов, особенно при низких температурах, имеют картину быстроразвивающихся трещин, мгновенно растущих дефектов, которые были характерны для плетей длиной 25 метров [3].

Методы контроля растягивающих усилий

Известны существующие методы контроля растягивающих усилий, действующих на рельс, например, заключающийся в том, что в рельсе выполняется отверстие, закрепляется датчик (с использованием тензорезисторов), реагирующий на изменение геометрических размеров отверстия [4]. Недостатком метода является то, что

снижается механическая прочность рельса, а также то, что датчик реагирует только на изменение растягивающих усилий.

Известен способ и устройство для измерения напряжений в рельсах, который производится с использованием тензорезистивных датчиков, наклеенных на рельс или шпалы. Недостатком метода является

⁸Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: распор. ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2544р (взамен № 2788р). М., 2016. 176 с. / Instructions for the design, laying, maintenance and repair of the continuous welded railway track: thrust. Russian Railways JSC 14 December, 2016 No. 2544p (in replacement of No. 2788p). М., 2016. 176 p.



то, что датчики должны быть наклеены на ненапряженный рельс до укладки его в шпальную решетку, а количество датчиков должно быть достаточно большим [5].

Известна система измерения усилий, действующих на рельс с использованием зависимости скорости распространения ультразвука в рельсе в зависимости от действующих на рельс напряжений [6]. Недостатком системы является слабая зависимость скорости распространения ультразвуковых колебаний от внутренних напряжений рельса, что делает метод недостаточно чувствительным к внутренним напряжениям при изменении геометрических параметров рельса, температуры и т.п.

Суть оригинального способа измерения растягивающих усилий, показанного на рис. 1, заключается в следующем: если рельс 1, растягиваемый силой F , закрепить в двух или более точках 3, на рельс между этими точками установить груз 2 достаточно большой массы M , то полученная система будет обладать свойствами маятника с сосредоточенными параметрами. Частота собственных колебаний такого маятника (груза) в направлениях перпендикулярных рельсу будет зависеть от величины растягивающей силы F . Эта частота является параметром, по которому можно измерять растягивающую силу. Также сигналом, зависящим от растягивающей силы, является амплитудно-частотная характеристика колебаний такой системы [7].

Для оценки сходимости физических и математических моделей разработана физическая модель рельсового пути, представленная на рис. 2. Модель включает в себя: 1 – два металлических уголка, имитирующих рельсовое полотно с деревянными шпалами; 2 – натяжное устройство; 3 – датчик вибрации; 4 – устройство для возбуждения колебаний (динамик); 5 – динамометр (исключающийся при измерениях); 6 – микрометрический датчик, позволяющий оценивать растяжение модели пу-

ти без применения динамометра по изгибу пластины из пружинной стали; 7 – пластина из пружинной стали.

Для имитации рельсового полотна использовался металлический уголок, шпалы имитировались деревянными брусками.

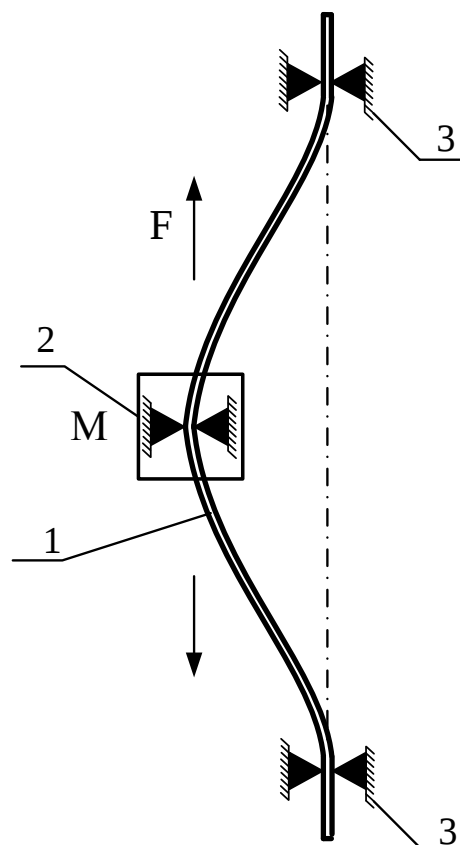


Рис. 1. Схема устройства
по измерению растягивающих усилий
Fig. 1. Diagram of the device
for measuring tensile forces

Динамометрический датчик⁹ использовался для калибровки пластины из пружинной стали 7, с изменением ее деформации с помощью микрометрического индикатора 6. В дальнейшем динамометрический датчик из системы исключается, так как является пружиной и слишком сильно влияет на изменение резонансных частот. На рис. 3 показана схема измерения резонансных частот рельсового пути.

⁹ГОСТ 14959-2006. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Введен 1981-01-01. М.: Изд-во Стандартиформ, 2009. 10 с. / GOST 14959-2006. Rolled stock from spring carbon and alloy steel. Introduced 1 January 1981. Moscow: Standartinform Publ., 2009. 10 p.

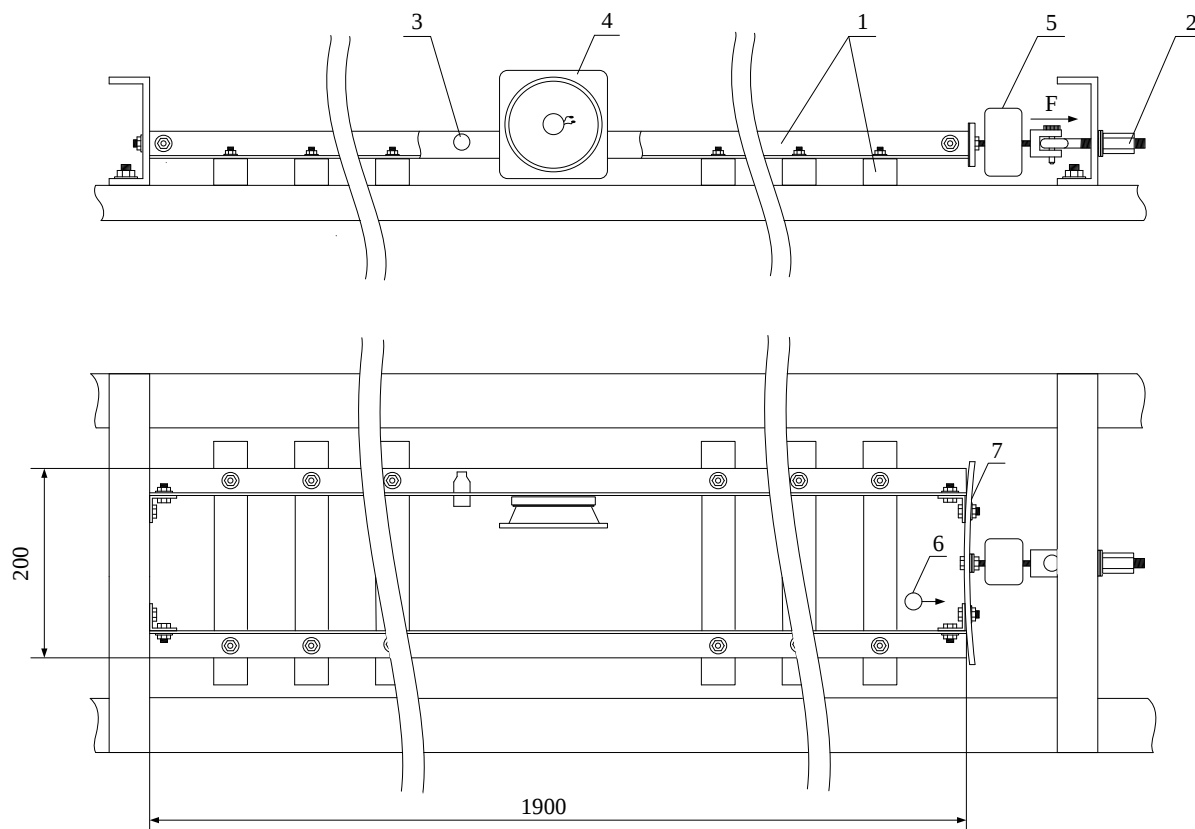


Рис. 2. Физическая модель рельсового пути
Fig. 2. Physical model of the rail track

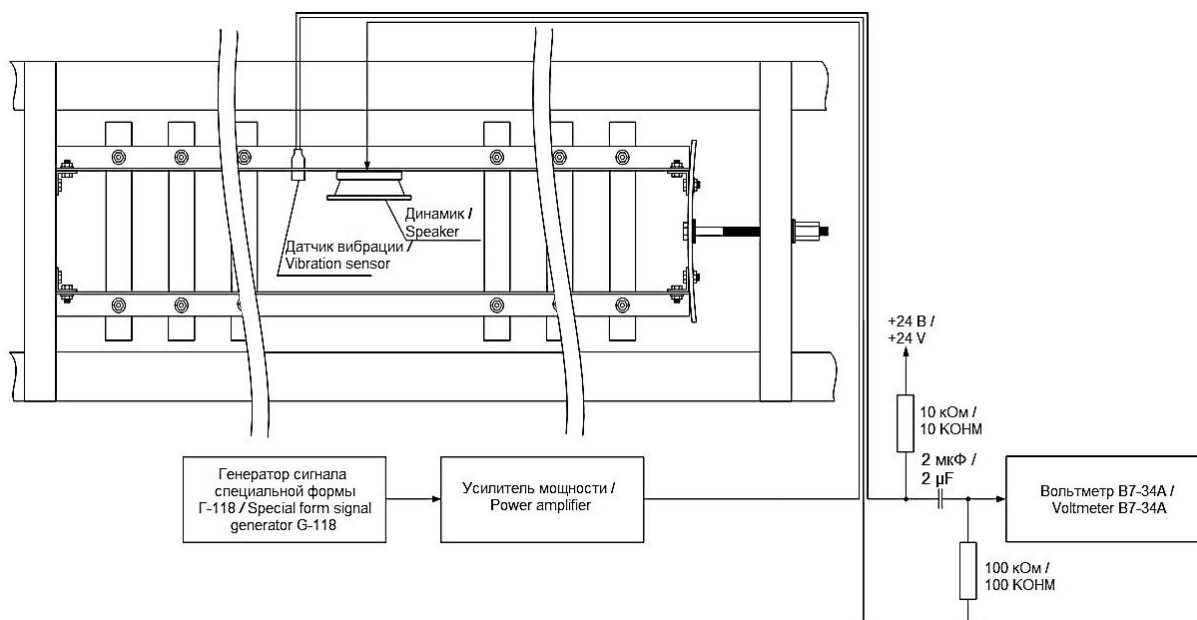


Рис. 3. Схема измерения резонансных частот в рельсовом пути
Fig. 3. Measuring diagram of resonance frequencies in the track

При измерениях резонанса физической модели были получены следующие характеристики: резонансная частота при

растягивающем усилии 100 Н составляет 39,2 Гц; резонансная частота при растягивающем усилии 3100 Н составляет 42,5 Гц.



Разработка математических моделей

Расчет параметров конечных элементов (КЭ) модели производился в среде MSC Nastran [8]. Во всех случаях использовались свойства материалов в упругой области без учета пластичности материалов. Рельсы, как на математической модели, так и на физической использовались из марки стали СтЗ^{10,11} [0], шпалы – анизотропный материал – дерево, методы соединения рельс – шпала – неподвижный контакт (glue contact). Граничные условия закрепления – шарнирные. Элементы конструкции моде-

лировались трехмерным конечным элементом (типа solid) [10].

Модель I рельсовых плетей показана на рис. 4, представляет собой два металлических уголка, имитирующих рельсовые плети. Граничные условия представляют собой шарнирное закрепление по краям рельсов. Присоединение торцов рельсов к шарниру осуществляется при помощи невесомых абсолютно жестких стержней, которые передают все нагрузки без потерь.

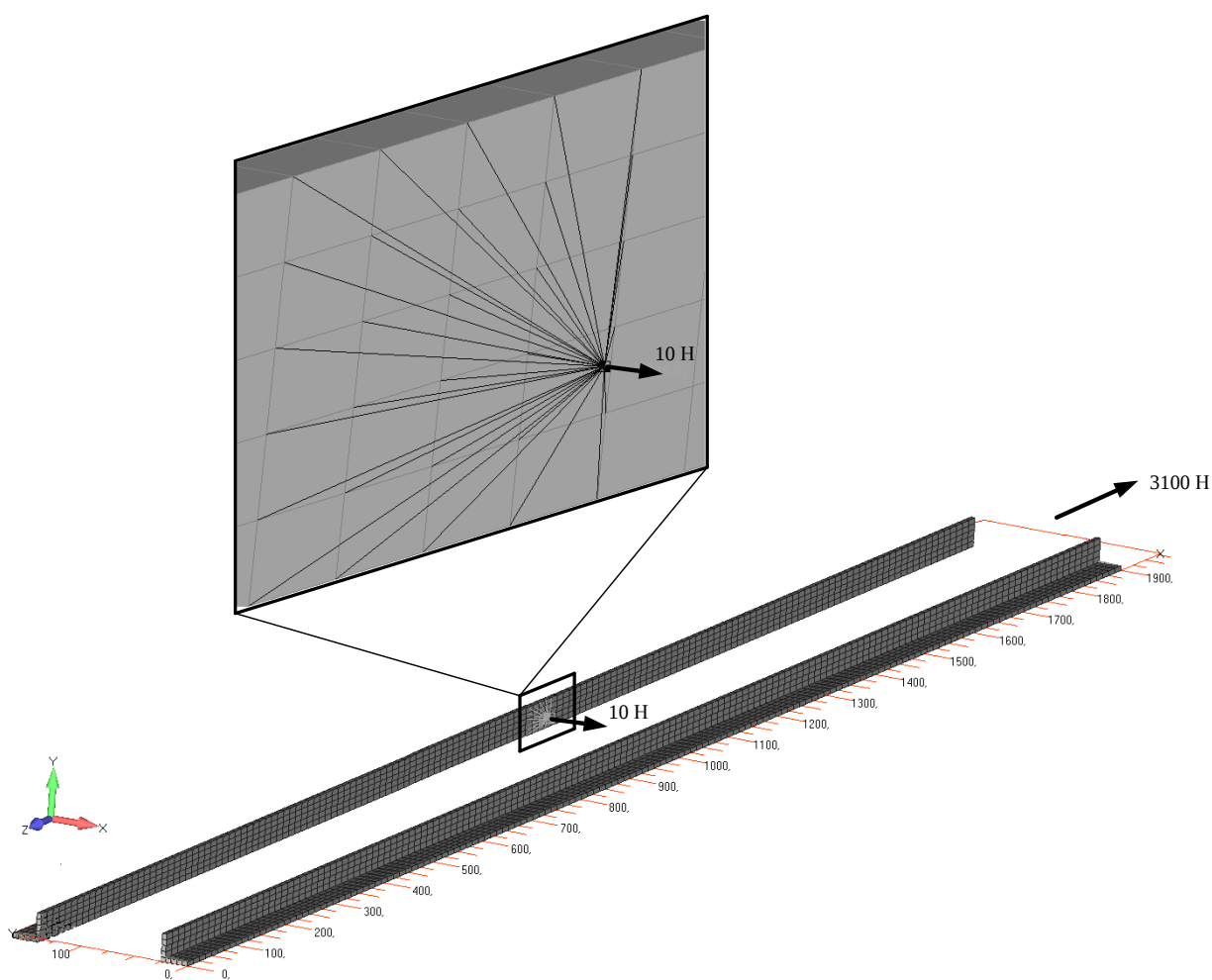


Рис. 4. Модель I рельсовых плетей
Fig. 4. Model I of rail bars

¹⁰ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. 2007–07–20. М.: Изд-во Стандартиформ, 2009. 4 с. / GOST 380-2005. Carbon steel of commercial quality. 2007-07-20. Moscow: Standartinform Publ., 2009. 4 p.

¹¹ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Взамен ГОСТ Р 51685-2000; введ. 2013–10–14. М.: Изд-во: Стандартиформ, 2014. 118 с. / GOST R 51685-2013. Railway rails. In replacement of GOST R 51685-2000; Introduced 14 October 2013. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 118 p.



Нагружение представляет собой возмущающую силу в 10 Н приложенную в центре пролета (рис. 4), с частотой колебаний изменяющейся от 0 до 140 Гц. Также к модели приложено растягивающее усилие, через невесомые абсолютно жесткие стержни. Расчет проводился для двух вариантов нагружения растягивающим усилием – 100 Н и 3100 Н. Ниже, на рис. 5 и рис. 6 представлены амплитудно-частотные характеристики при заданных растягивающих усилиях.

Как видно из рис. 5 и рис. 6, первая резонансная частота увеличивается из-за

повышения растягивающего усилия и лежит в диапазоне от 22 до 24 Гц в зависимости от величины растягивающего усилия. Недостатком этой модели является малая жесткость конструкции, не соответствующая (физической) экспериментальной модели.

Модель II рельсовых плетей, показанная на рис. 7, отличается от предыдущей тем, что в ней учтено влияние шпал. Ниже, на рис. 8 и рис. 9 представлены амплитудно-частотные характеристики при растягивающих усилиях в 100 Н и 3100 Н.

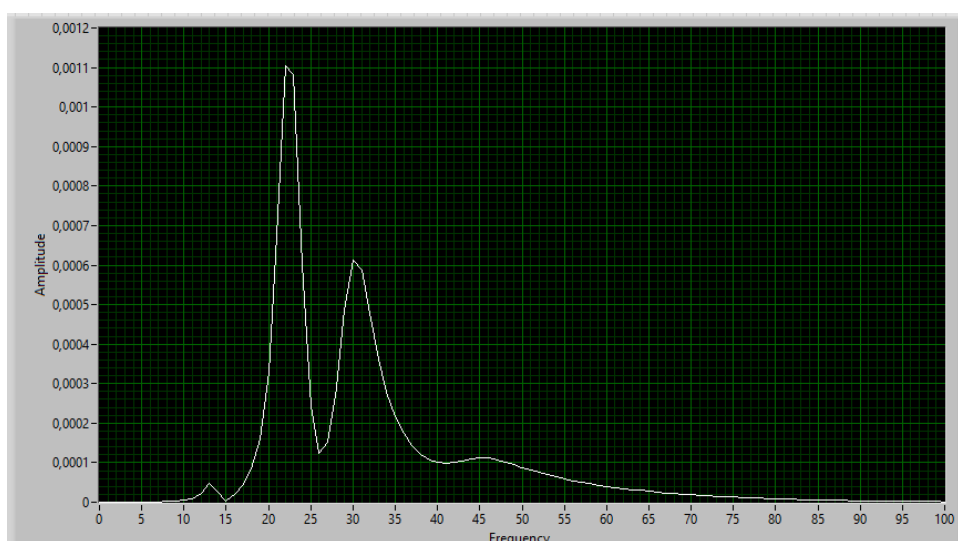


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики модели I рельсовых плетей (при натяжении в 100 Н)
Fig. 5. Amplitude-frequency characteristics of the model I of rail bars (under 100 N tension)

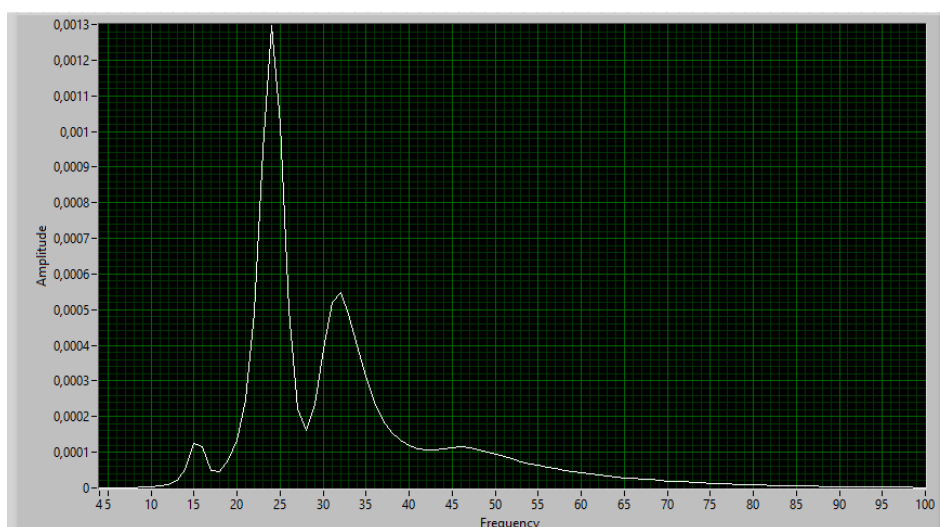


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики модели I рельсовых плетей (при натяжении в 3100 Н)
Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of the model I of rail bars (under 3100 N tension)

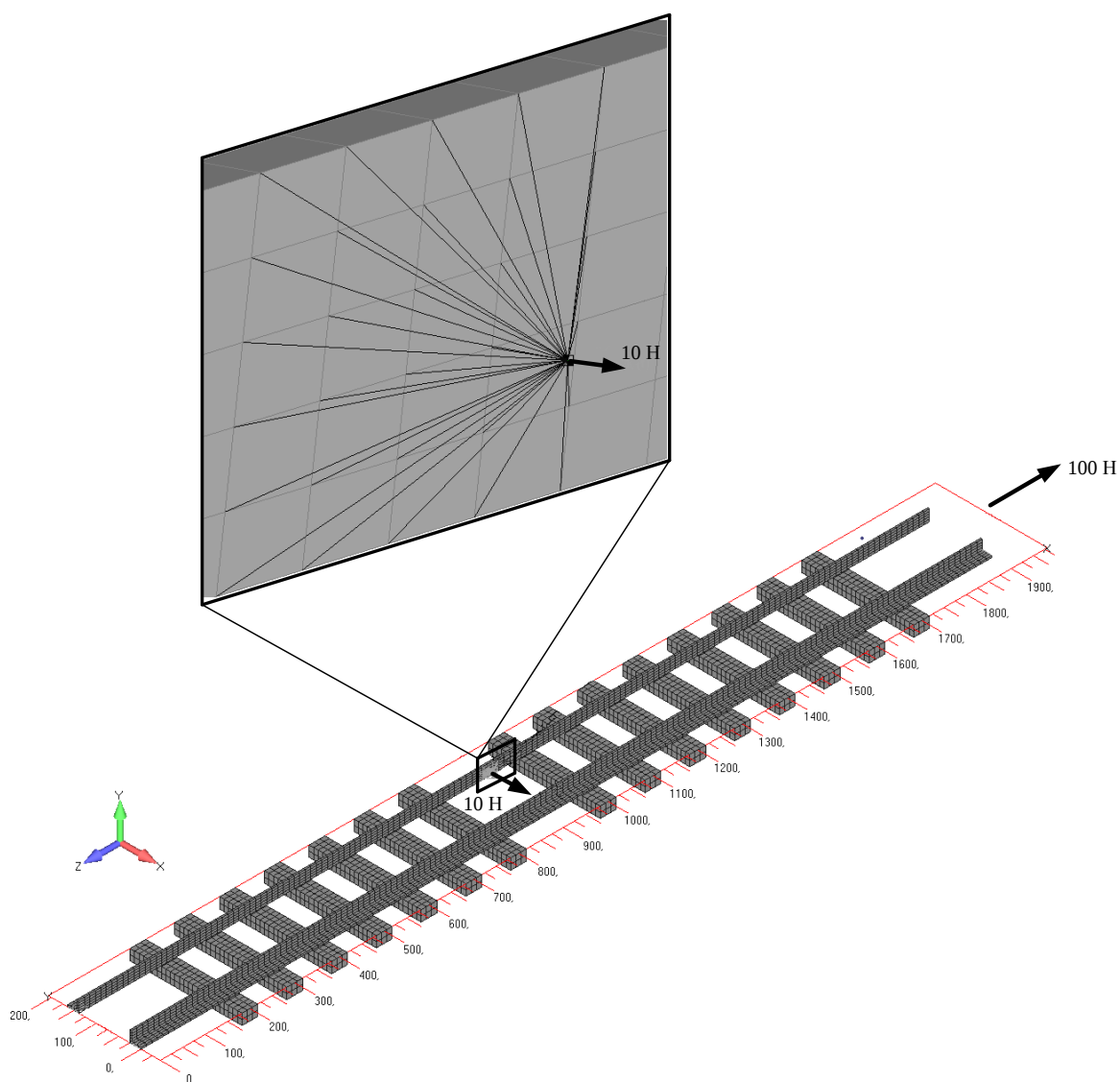


Рис. 7. Модель II рельсовых плетей
Fig. 7. Model II of rail bars

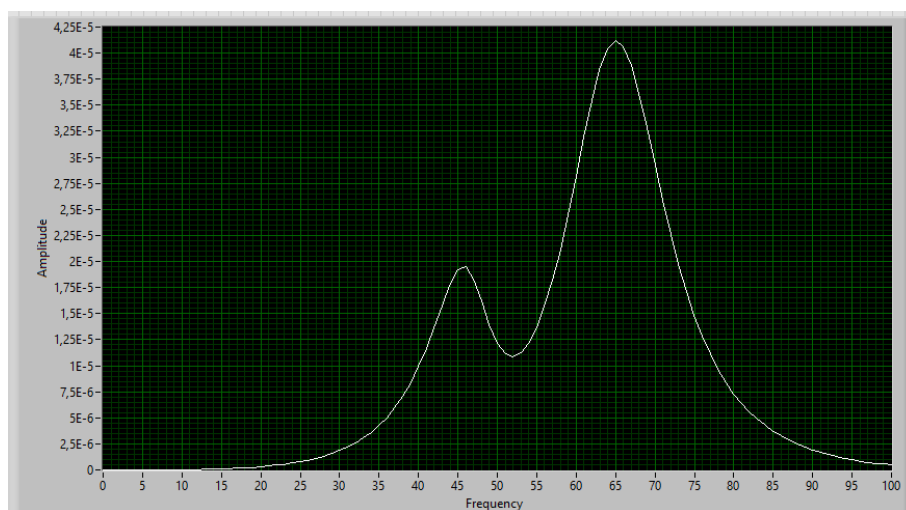


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики модели II рельсовых плетей (при натяжении в 100 Н)
Fig. 8. Amplitude-frequency characteristics of the model II of rail bars (under 100 N tension)

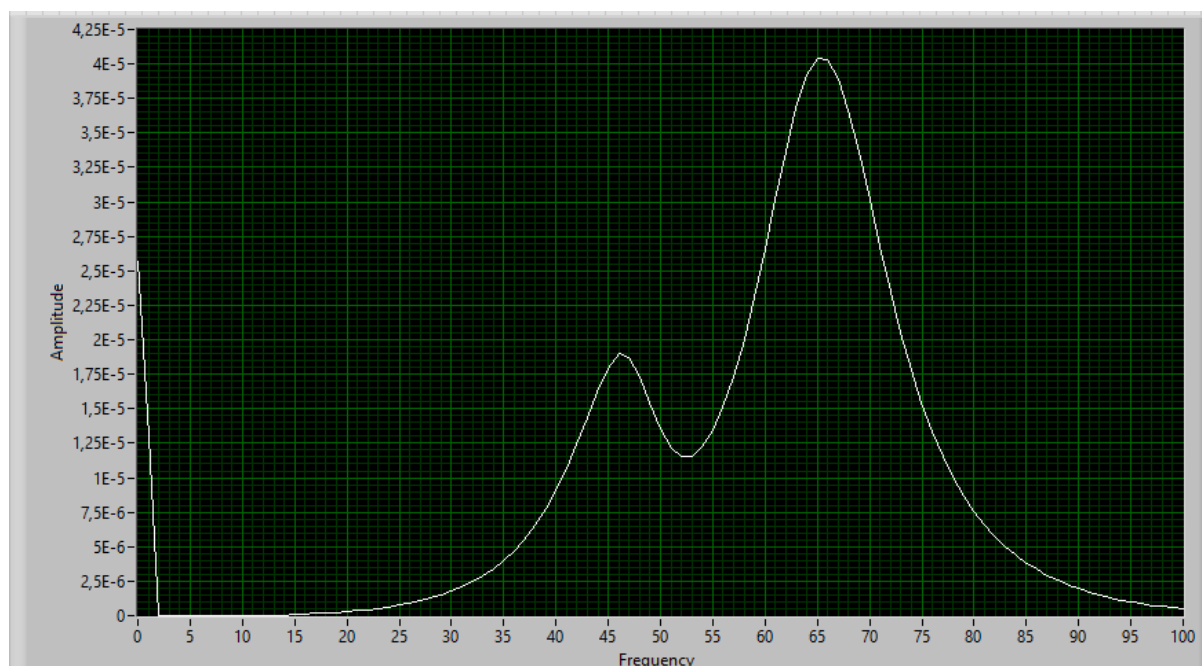


Рис. 9. Амлитудно-частотные характеристики модели II рельсовых плетей (при натяжении в 3100 Н)
Fig. 9. Amplitude-frequency characteristics of the model II of rail bars (under 3100 N tension)

Как видно из рис. 8 и рис. 9, жесткость конструкции по сравнению с предыдущей моделью значительно возросла за счет наличия шпал, что сказалось на первой резонансной частоте, которая сдвинулась в диапазон 45–47 Гц. Присоединение абсолютно жестких стержней к торцам уголков не в полной мере обеспечивает адекватные закрепления, делая их более жесткими, чем необходимо. Такие закрепления привели к близкому расположению первой и второй резонансных частот, что вызывает биение конструкции (периодические изменения величины амплитуды при колебаниях).

Модель III рельсовых плетей, показанная на рис. 10, отличается от предыдущей тем, что в ней учтены торцевые уголки (как в экспериментальной модели), что должно обеспечить снижение жесткости закреплений. Закрепления и нагружения выполнены аналогично предыдущей модели.

Ниже, на рис. 11 и рис. 12 представлены амлитудно-частотные характеристики при растягивающих усилиях в 100 Н и 3100 Н.

Как видно из графиков, жесткость конструкции по сравнению с предыдущей моделью немного снизилась за счет введения металлических уголков на торцах мо-

дели, что сказалось на первой резонансной частоте, которая сдвинулась в диапазон 41–42 Гц. Но растягивающее усилие передается на конструкцию через абсолютные жесткие элементы, что неверно отражает реальное поведение конструкции, так как в реальности стержень натяжного устройства, за который производится растяжение, тоже растягивается.

Модель IV рельсовых плетей, показанная на рис. 13, отличается от предыдущей тем, что в ней учтено влияние торцевой пластины и стержня, через которые производится передача растягивающего усилия на рельсы и торцевые уголки (как в экспериментальной модели), что должно обеспечить еще большее снижение жесткости закреплений. Закрепления и нагружения выполнены аналогично предыдущей модели.

Ниже, на рис. 14 и рис. 15 представлены амлитудно-частотные характеристики при растягивающих усилиях в 100 Н и 3100 Н.

Как видно из амлитудно-частотных характеристик, жесткость конструкции по сравнению с предыдущей моделью немного снизилась за счет введения торцевой пластины и стержня, к которому приложено растягивающее усилие, что сказалось на



первой резонансной частоте, которая сдвинулась в диапазон 39–41 Гц. Эта расчетная модель является наиболее достоверной в сравнении с физической моделью, которая

позволит произвести исследования нового предлагаемого способа замера растягивающих усилий в рельсовых плетях.

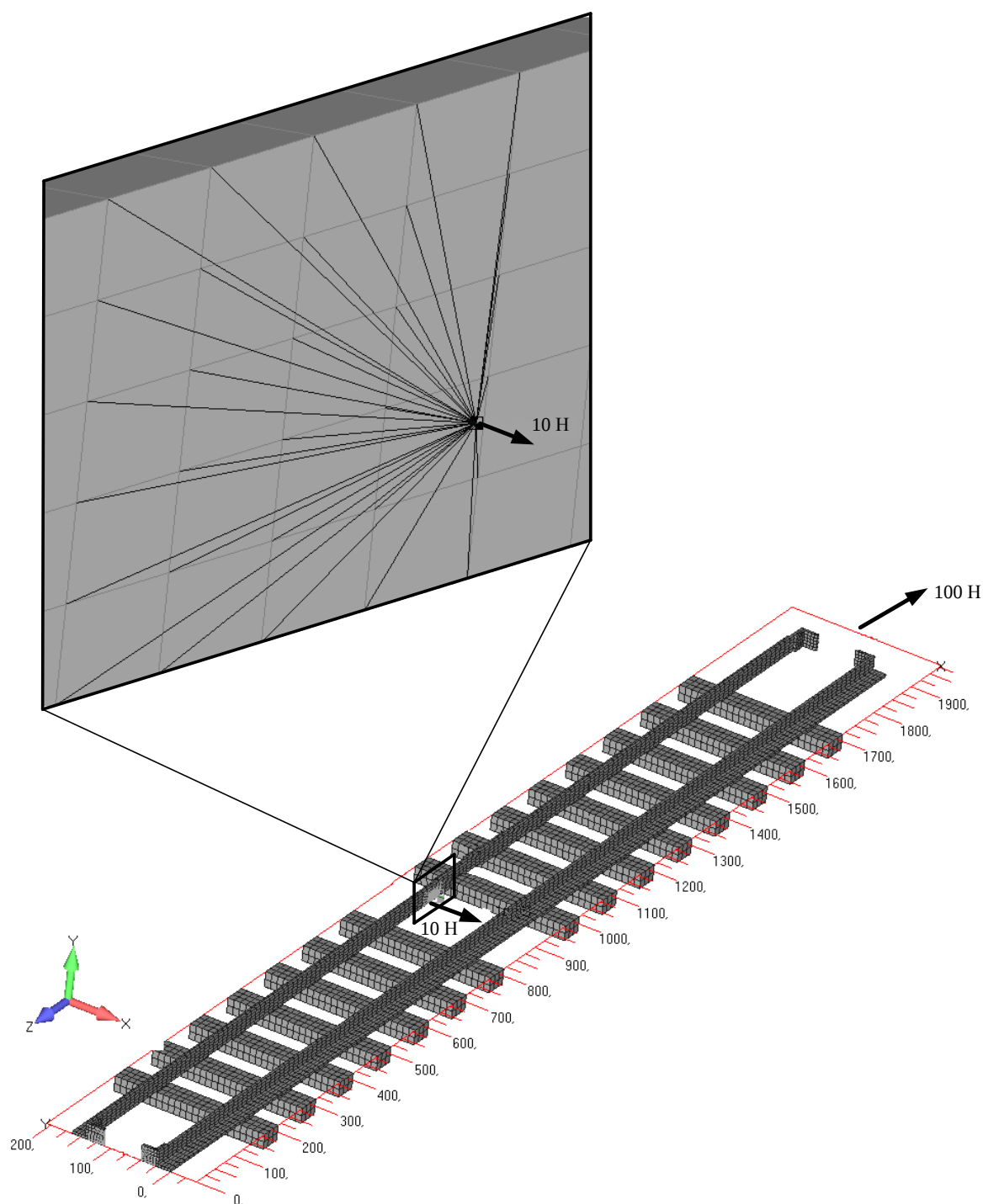


Рис. 10. Модель III рельсовых плетей
Fig. 10. Model III of rail bars

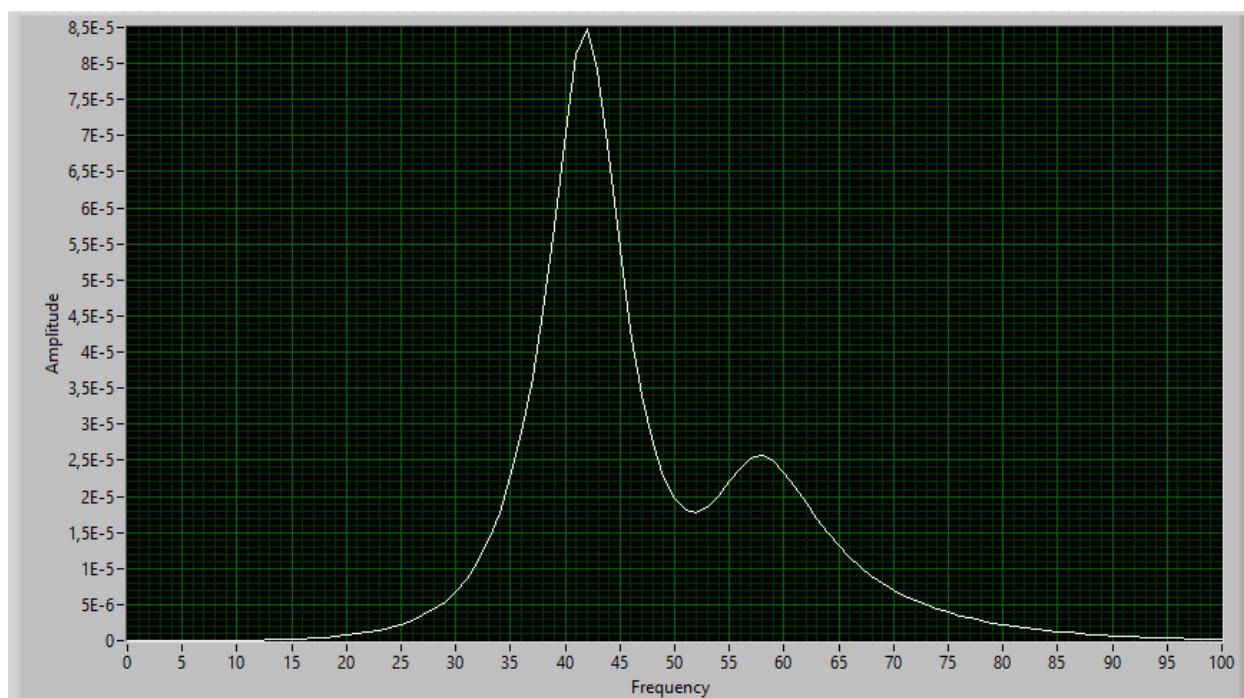


Рис. 11. Амлитудно-частотные характеристики модели III рельсовых плетей (при натяжении в 100 Н)

Fig. 11. Amplitude-frequency characteristics of the model III of rail bars (under 100 N tension)

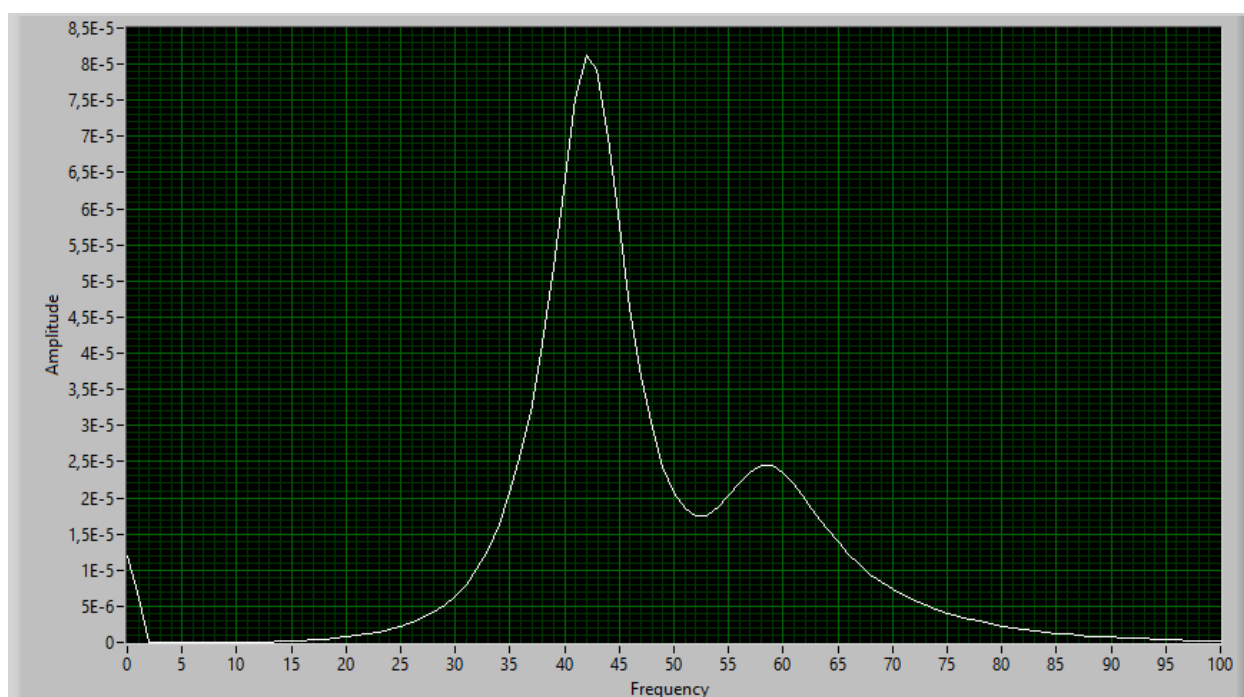


Рис. 12. Амлитудно-частотные характеристики модели III рельсовых плетей (при натяжении в 3100 Н)

Fig. 12. Amplitude-frequency characteristics of the model III of rail bars (under 3100 N tension)

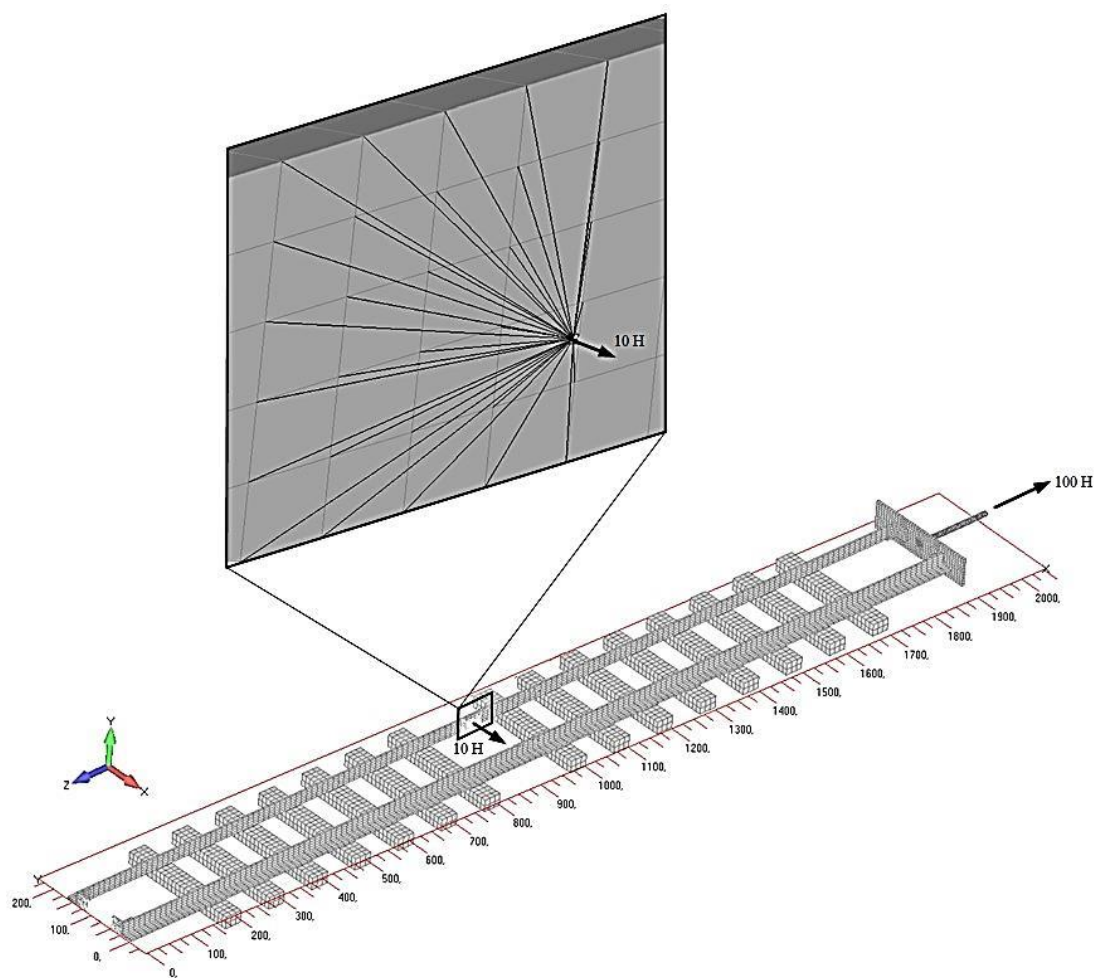


Рис. 13. Модель IV рельсовых плетей
Fig. 13. Model IV of rail bars

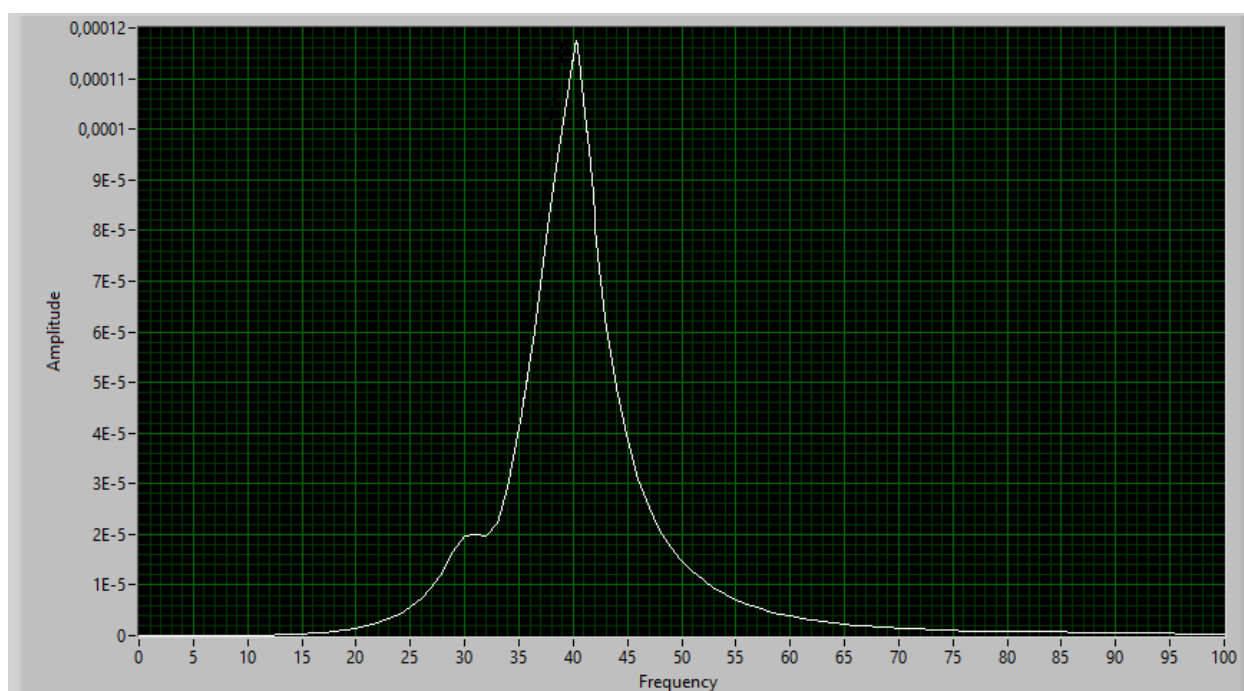


Рис. 14. Амплитудно-частотные характеристики модели IV рельсовых плетей (при натяжении в 100 Н)
Fig. 14. Amplitude-frequency characteristics of the model IV of rail bars (under 100 N tension)

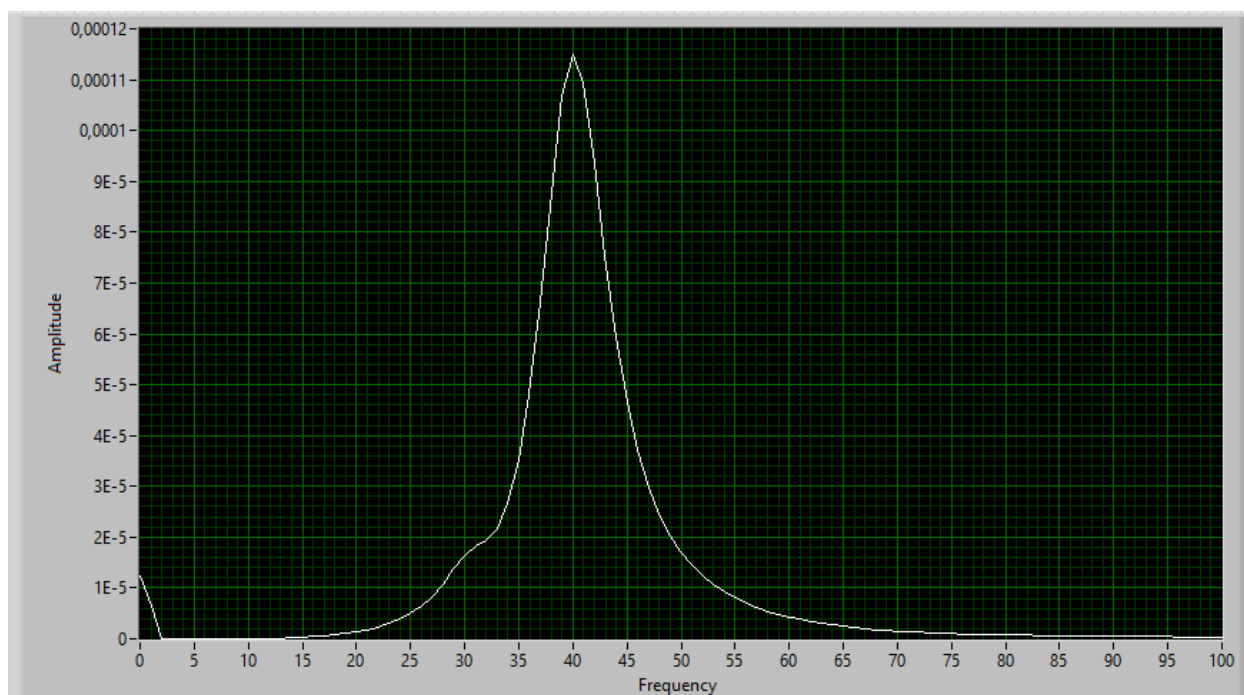


Рис. 15. Амплитудно-частотные характеристики модели IV рельсовых плетей (при натяжении в 3100 Н)

Fig. 15. Amplitude-frequency characteristics of the model IV of rail bars (under 3100 N tension)

Заключение

На основании сходимости результатов амплитудно-частотных характеристик получена расчетная модель, которая является наиболее достоверной в сравнении с физической моделью, позволяющей проводить исследования предлагаемого авторами способа замера растягивающих усилий в рельсовых плетях.

Полученные амплитудно-частотные характеристики модели от параметров рас-

тягивающих усилий при достаточно малом изменении резонансной частоты будут дополнительно исследованы с целью получения оптимальных условий регистрации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта № 17-20-01-059\17.

Библиографический список

1. BRITISH RAILWAYS BOARD. Measuring changes in longitudinal force in the rail1. Patent UK, no. 1336311, 1973.
2. Msc/nastran for Windows. Краткий справочник пользователя. The MacNeal Schwendler Corporation. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfiles.net/preview/2787749/> (01.12.2017)
3. Retting Manfred, Groll Peter. Method and device for determining forces exerted on a rail. Patent DE, no. 1793211, 2006.
4. Searle Donald S. Dynamic rail longitudinal stress measuring system. Patent US, no. 5386727, 1995.
5. Крейнис З.Л., Селезнева Н.Е., Бесстыковой путь. М.: Маршрут, 2005, 84 с.
6. Захаров С.М., Богданов В.М. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. М.: Интекст, 2002. 408 с.
7. Пат. № 2487325, Российская Федерация, МПК: G01L1/00. Способ измерения растягивающих усилий, действующих на рельс, и устройство для его реализации / А.Ю. Портной, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко; заявитель и патентообладатель ИрГУПС. Заявл. 26. 05.2010; опубл. 10.07.2013.
8. Стали и сплавы. Марочник: справочник / Под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. 608 с.



9. Шахуняц Г.М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1969. 536 с.

10. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. Сер. Проектирование. М.: ДМК Пресс, 2001. 448 с.

References

1. BRITISH RAILWAYS BOARD. Measuring changes in longitudinal force in the rail. Patent UK, no. 1336311, 1973.
2. Msc/nastran for Windows. Kratkij spravochnik pol'zovatelja [Quick user's reference book]. The Mac-Neal Schwendler Corporation. Available at: <https://studfiles.net/preview/2787749/> (1 December 2017)
3. Retting Manfred, Groll Peter. Method and device for determining forces exerted on a rail. Patent DE, no. 1793211, 2006.
4. Searle Donald S. Dynamic rail longitudinal stress measuring system. Patent US, no. 5386727, 1995.
5. Krejnis Z.L., Selezneva N.E., Besstykovoj put' [Continuous welded rail]. Moscow: Marshrut Publ., 2005, 84 p. (In Russian).
6. Zaharov S.M., Bogdanov V.M. Obobshhenie peredovogo opyta tjazhelovesnogo dvizhenija: voprosy vzaimodejstvija koleasa i rel'sa [Generalization of the

advanced experience of heavy traffic: wheel and rail interaction issues]. Moscow: Intekst Publ., 2002. 408 p. (In Russian).

7. Portnoj A.Ju., Mel'nichenko O.V., Shramko S.G. Sposob izmerenija rastjagivajushhih usilij, dejstvujushhih na rel's, i ustrojstvo dlja ego realizacii [Measurement method of tensile forces acting on the rail and a device for its implementation] Patent RF, no. 2487325, 2013.

8. Stali i splavy. Marochnik: spravochnik [Steels and alloys. Grade guide: reference book]. M.: «Internet Inzhiniring», 2001. 608 p. (In Russian).

9. Shahunjanc G.M. Zheleznodorozhnyj put' [The railway way]. Moscow: Transport Publ., 1969, 536 p. (In Russian).

10. Shimkovich D.G. Raschet konstrukcij v MSC/NASTRAN for Windows [Structural design in MSC / NASTRAN for Windows]. M.: DMK Press Publ., 2001. 448 p. (In Russian).

Критерии авторства

Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Агафонов В.М., Линьков А.О., Шрамко С.Г., Яговкин Д.А., Устинов Р.И. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Melnichenko O.V., Portnoj A.Yu., Agafonov V.M., Linkov A.O., Shramko S.G., Yagovkin D.A., Ustinov R.I. 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.



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СМЕЩЕНИЯ ТЕЛА И АМПЛИТУДЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМИ ОБЪЕКТА ВИБРОЗАЩИТЫ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

© О.А. Свирбутович¹, Е.В. Елтошкина², П.И. Ильин³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

^{2,3}Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, Российская Федерация, 664038, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, 1.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В статье исследуется зависимость изменения максимального значения смещения тела и максимального значения амплитуды управления колебаниями объекта защиты твердого тела. **МЕТОДЫ.** Проведен анализ эффективности использования двухэтапного метода синтеза параметров, обеспечивающих заданные требования к качеству виброизоляции с учетом математической модели конструирования виброзащитной системы от заданного кинематического воздействия, вызванного гармоническими и полигармоническими колебаниями основания. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Показано, что задачу синтеза оптимальных структур системы виброизоляции можно свести к задаче параметрической оптимизации. Под задачей параметрической оптимизации виброзащитной системы понимаем задачу определения оптимальных параметров системы виброизоляции объекта при выбранной (или заданной) структуре и наличии полной информации об объекте и возмущениях, действующих на него. **ВЫВОДЫ.** Определено, что при оптимальной виброзащитной системе с ростом значения α максимальное смещение возрастает, а максимальное значение функции управления убывает, следовательно, выбором весового коэффициента α можно добиваться одновременного выполнения требований, накладываемых на качество виброзащиты и ограничения габаритных размеров.

Ключевые слова: колебание, виброзащита, закон движения тела, управление, конструирование, анализ, синтез параметров.

Информация о статье: Дата поступления 07 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 19 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 27 февраля 2018 г.

Формат цитирования: Свирбутович О.А., Елтошкина Е.В., Ильин П.И. Исследование зависимости смещения тела и амплитуды управления колебаниями объекта виброзащиты колесных транспортных средств // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 228–237. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-230-239

DEPENDENCY STUDY OF BODY DISPLACEMENT AND CONTROL AMPLITUDE OF VIBRATION PROTECTION OBJECT OSCILLATIONS OF WHEELED VEHICLES

O.A. Svirbutovich, E.V. Eltozhkina, P.I. Ilyin

Irkutsk National Research Technical University,

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,

1 Molodezhny settlement, Irkutsk District, Irkutsk Region, 664038, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The article studies the dependence of the change in the maximum value of body displacement and the maximum value of the control amplitude of solid body protection object oscillations. **METHODS.** The efficiency of the two-stage method of parameter synthesis is analyzed. These parameters ensure specified requirements to the quality of vibration isolation taking into account a mathematical design model of the system of vibration protection from a given

¹Свирбутович Ольга Александровна, кандидат социологических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, e-mail: zazetta77@mail.ru.

Olga A. Svirbutovich, Candidate of Sociology, Associate Professor of the Department of Automobile Transport, e-mail: zazetta77@mail.ru.

²Елтошкина Евгения Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры математики, e-mail: eev_baikal2005@mail.ru.

Evgenia V. Eltozhkina, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, e-mail: eev_baikal2005@mail.ru.

³Ильин Петр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, безопасности жизнедеятельности и профессионального обучения, e-mail: ipi.academy@mail.ru.

Petr I. Ilyin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Machine and Tractor Rolling Stock Operation, Life Safety and Professional Training, e-mail: ipi.academy@mail.ru.



kinematic impact caused by harmonic and polyharmonic oscillations of the base. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** It is shown that the problem of synthesis of optimal structures of the vibration isolation system can be reduced to the problem of parametric optimization. We treat the problem of parametric optimization of the vibration protection system as a problem of determining the optimal parameters of the object vibration isolation system under the selected (or given) structure and available complete information about the object and perturbations affecting it. **CONCLUSIONS.** It is determined that if vibration protection system is optimal the growth of the value α causes the increase in maximum displacement whereas the maximum value of the control function decreases. Therefore, choosing the weighting factor α we can achieve simultaneous fulfillment of the quality requirements for vibration protection and limit overall dimensions.

Keywords: vibration, vibration protection, law of body motion, control, design, analysis, parameter synthesis.

Article info. Received December 07, 2017; accepted February 19, 2018; available online February 27, 2018.

For citation: Svirbutovich O.A., Eltoshkina E.V., Ilyin P.I. Dependency study of body displacement and control amplitude of vibration protection object oscillations of wheeled vehicles. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 2, pp. 228–237. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-230-239

Введение

Процесс «оздоровления» современного рынка предполагает модернизацию предприятий народного хозяйства посредством подъема инжиниринга, реализации технических и технологических решений, которые приведут действующий объект на новый уровень конкурентоспособности.

Конкурентоспособность предприятия зависит от анализа использования его внутреннего потенциала, который включает в себя производственную, кадровую и экономическую составляющие [1, 2]. Следовательно, реинжиниринг производственного потенциала предприятия невозможен без научной организации условий труда.

Условия труда в народном хозяйстве в значительной мере определяются уровнем механизации процессов производства и использованием современных технологий. Основу механизации многих отраслей составляют колесные транспортные средства, энергонасыщенные самоходные машины, комплексы навесных и прицепных машин и механизмов, обеспечивающих выполнение рабочих операций по механизированному процессу производства [3, 4]. Одним из основных неблагоприятных факторов при работе на грузовых и специальных транспортных средствах являются вибрации. Кабина позволяет защитить водителя от непосредственного воздействия высоких и низких температур, воздействия осадков, но не обеспечивает достаточной изоляции от вибрационного воздействия, источниками которого в основном являются ходовая часть и двигатель.

Цель исследования состоит в установлении зависимости изменения максимального значения смещения тела и значения амплитуды управления колебаниями объекта защиты твердого тела, при использовании двухэтапного метода синтеза параметров, обеспечивающих заданные требования к качеству виброизоляции. Соответственно объектом исследования будет являться математическая модель конструирования виброзащитной системы, зависимой от заданного кинематического воздействия, вызванного гармоническими и полигармоническими колебаниями основания колесного транспортного средства.

Задача параметрической оптимизации

Отметим, что задачу синтеза оптимальных структур системы виброизоляции можно в принципе свести к задаче параметрической оптимизации. Под задачей параметрической оптимизации виброзащитной системы понимают задачу определения оптимальных параметров системы виброизоляции объекта при выбранной (или заданной) структуре и наличии полной информации об объекте и возмущениях, действующих на него [5].

Действительно, на практике существует конечное число виброизоляторов, имеющих ту или иную упруго-демпфирующую характеристику и конструктивную схему, окончательная ко-



личественная оценка преимуществ и недостатков которых может быть осуществлена посредством решения нескольких задач параметрической оптимизации с использованием математических моделей, учитывающих особенности каждого из рассматриваемых структур виброизоляции. Кроме того, к задаче параметрической оптимизации могут быть сведены задачи оптимизации активных виброзащитных систем [6].

При решении задач параметрической оптимизации наибольшее распространение получили методы поиска. Суть методов поиска заключается в организации движения изображающей точки v в пространстве конструктивных параметров V , в результате которого достигается приближение к экстремуму функции цели. При этом для начала поиска возникает необходимость выбора начальной изображающей точки в пространстве конструктивных параметров, от выбора которой зависит эффективность поиска оптимальных значений параметров [7, 8].

Таким образом, задачу синтеза параметров рассмотрим следующим образом:

- на первом шаге решения задачи будем искать параметры $v \in V$, удовлетворяющие требованиям к качеству виброизоляции;
- на втором шаге, используя найденные на первом шаге параметры v в качестве начальной точки, рассмотрим решение задачи параметрической оптимизации с критерием качества.

Другими словами, предлагаемый подход к синтезу параметров, обеспечивающих заданные требования к качеству виброизоляции, включает в себя два этапа. Первый этап – определение желаемого (эталонного) закона движения объекта защиты. Второй этап – определение параметров виброзащитной системы, наиболее близко реализующих найденный на первом этапе желаемый закон движения [9, 10].

В частности, мы можем рассмотреть одномерную задачу конструирования системы виброзащиты от заданного кинематического воздействия, вызванного поступательными колебаниями основания (рис. 1).

Дифференциальное уравнение колебаний объекта защиты в системе координат (связанной с основанием) имеет вид

$$\ddot{y} = v(t) - \ddot{\sigma}(t), \quad (1)$$

$$\ddot{\sigma}(t) = -A \sin \phi t, \quad (2)$$

$$|y(t)| \leq L, |v(t)| \leq \ell, \quad (3)$$

где $\ddot{\sigma}(t)$ – заданный закон изменения ускорения основания; $v(t)$ – динамическая реакция системы виброзащиты.

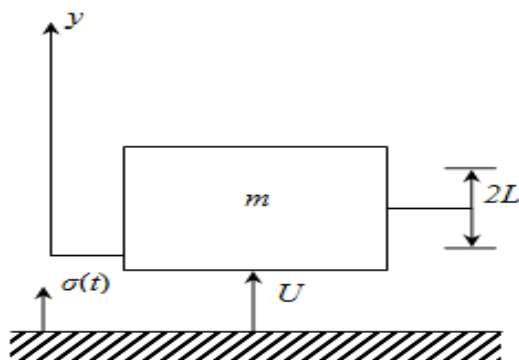


Рис. 1. Динамическая схема для задачи конструирования системы виброзащиты с одной степенью свободы

Fig. 1. Dynamic scheme for the problem of designing a vibration protection system with one degree of freedom



Требуется определить структуру динамической реакции системы виброзащиты $v(y, \dot{y}, t)$, доставляющей минимум критерию качества.

$$J(v(\cdot)) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{L^2} y^2 + \frac{\gamma^2}{\ell^2} v^2(y, \dot{y}, t) \right) dt, \quad (4)$$

где γ – заданный весовой коэффициент.

Отметим, что минимизация $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{L^2} y^2 dt$ вызвана стремлением ограничить габаритные размеры виброзащитной системы, а минимизация $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\gamma^2}{\ell^2} v^2(y, \dot{y}, t) dt$ соответствует уменьшению перегрузок, возникающих в объекте защиты.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим первый этап двухэтапного синтеза параметров виброзащитной системы, то есть проведем построение эталонного закона движения виброзащитной системы.

Введя замену: $y = x_1$, $\dot{x}_1 = x_2$ в исходную задачу (1)–(4), запишем ее в следующем виде (5)–(7):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = v(t) - \ddot{\sigma}(t), \end{cases} \quad (5)$$

$$J(v(\cdot)) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{L^2} x_1^2(t) + \frac{\gamma^2}{\ell^2} v^2(t) \right) dt, \quad (6)$$

$$|x_1(t)| \leq L, |v(t)| \leq \ell. \quad (7)$$

Составим гамильтониан

$$H = \psi_1 x_2 + \psi_2 (v - \ddot{\sigma}(t)) - \frac{1}{L^2} x_1^2 - \frac{\gamma^2}{\ell^2} v^2,$$

где $\psi_1(t)$, $\psi_2(t)$ – сопряженные переменные.

Тогда управление $v^\circ(t)$ удовлетворяет условию максимума гамильтониана:

$$\frac{\partial H}{\partial v} = \psi_2 - \frac{2\gamma^2}{\ell^2} v^\circ(t) = 0.$$

Из этого условия выразим

$$v^\circ(t) = \frac{\psi_2 \ell^2}{2\gamma^2}. \quad (8)$$

Запишем сопряженную систему:



$$\begin{aligned}\dot{\psi}_1 &= -H_{x_1} = \frac{2x_1}{L^2}, \\ \dot{\psi}_2 &= -H_{x_2} = -\psi_1.\end{aligned}\quad (9)$$

Подставив (8) в систему (5) и объединив ее с системой (9), получим

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{\psi_2 \ell^2}{2\gamma^2} - \ddot{\sigma}(t), \\ \dot{\psi}_1 = \frac{2x_1}{L^2}, \\ \dot{\psi}_2 = -\psi_1. \end{cases}\quad (10)$$

Будем искать эталонный закон движения исходной задачи в виде частного решения системы уравнений (10), которое является единственным. Для этого продифференцируем первое и четвертое уравнения системы, после чего избавимся от переменных x_2 и ψ_1 :

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \dot{x}_2 = \frac{\psi_2 \ell^2}{2\gamma^2} - \ddot{\sigma}(t), \\ \ddot{\psi}_2 = -\dot{\psi}_1 = -\frac{2x_1}{L^2}. \end{cases}\quad (11)$$

Теперь продифференцируем $\ddot{x}_1$ два раза по t и подставим вместо $\ddot{\psi}_2$ его значение из второго уравнения системы (11):

$$\begin{aligned}x_1^{(3)} &= \frac{\ell^2}{2\gamma^2} \dot{\psi}_2 - \sigma^{(3)}(t), \quad x_1^{(4)} = \frac{\ell^2}{2\gamma^2} \ddot{\psi}_2 - \sigma^{(4)}(t), \\ \ddot{\sigma}(t) &= -A \sin \phi t, \quad \sigma^{(3)}(t) = -A\phi \cos \phi t, \quad \sigma^{(4)}(t) = -A\phi^2 \sin \phi t, \\ x_1^{(4)} &= -\frac{\ell^2}{2\gamma^2 L^2} x_1 - A\phi^2 \sin \phi t.\end{aligned}$$

В результате получим следующее дифференциальное уравнение:

$$x_1^{(4)} + \frac{\ell^2}{2\gamma^2 L^2} x_1 = -A\phi^2 \sin \phi t.\quad (12)$$

Будем рассчитывать частное решение методом неопределенных коэффициентов в виде:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1 &= B \sin \phi t + D \cos \phi t, & \tilde{x}_1' &= B\phi \cos \phi t - D\phi \sin \phi t, \\ \tilde{x}_1'' &= -B\phi^2 \sin \phi t - D\phi^2 \cos \phi t, & \tilde{x}_1^{(3)} &= -B\phi^3 \cos \phi t + D\phi^3 \sin \phi t,\end{aligned}$$



$$\tilde{x}_1^{(4)} = B\phi^4 \sin \phi t + D\phi^4 \cos \phi t,$$

$$B\phi^4 \sin \phi t + D\phi^4 \cos \phi t + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2} B \sin \phi t + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2} D \cos \phi t = -A\phi^2 \sin \phi t,$$

$$\begin{cases} B\phi^4 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2} B = -A\phi^2, \\ D\phi^4 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2} D = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} B = -\frac{A\phi^2}{\phi^4 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}}, \\ D = 0. \end{cases}$$

Подставив найденные коэффициенты B и D в формулу общего вида частного решения уравнения (12), получим выражение, определяющее эталонный закон движения исходной задачи:

$$y(t) = -\frac{A\phi^2}{\phi^4 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \sin \phi t. \quad (13)$$

Теперь получим эталонное управление по формуле (9). Для этого нам надо найти ψ_2 :

$$\ddot{\psi}_2 = -\frac{2x_1}{L^2}, \quad \ddot{\psi}_2 = \frac{2}{L^2} \frac{A\phi^2}{\phi^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \sin \phi t,$$

$$\dot{\psi}_2 = \frac{2}{L^2} \frac{A\phi^2}{\phi^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \int \sin \phi t dt = -\frac{2}{L^2} \frac{A\phi^2}{\phi^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \cos \phi t,$$

$$\psi_2 = -\frac{2}{L^2} \frac{A\phi^2}{\phi^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \int \cos \phi t = -\frac{2}{L^2} \frac{A\phi^2}{\phi^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \sin \phi t,$$

$$v^3(t) = -\frac{2}{L^2} \frac{A\phi^2}{\phi^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \frac{\ell^2}{2\gamma^2} \sin \phi t = -\frac{A}{\frac{\gamma^2 L^2}{\ell^2} \phi^4 + 1} \sin \phi t.$$

Таким образом, эталонное управление, соответствующее эталонной траектории (13), выглядит следующим образом (14):



$$v^3(t) = -\frac{A}{\frac{\gamma^2 L^2}{\ell^2} \phi^4 + 1} \sin \phi t. \quad (14)$$

Обобщим теперь полученные результаты на случай полигармонических возмущений

$$\ddot{\sigma}(t) = -\sum_{i=1}^N A_i \sin \phi_i t. \quad (15)$$

При этом управление $v^3(t)$ будет определяться по той же формуле, что и при гармонических колебаниях, то есть по формуле (8).

В силу (15) уравнение (12) примет вид:

$$x_1^{(4)} + \frac{\ell^2}{2\gamma^2 L^2} x_1 = -\sum_{i=1}^N A_i \phi_i^2 \sin \phi_i t. \quad (16)$$

Запишем общий вид частного решения уравнения (16):

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \sum_{i=1}^N B_i \sin \phi_i t + \sum_{i=1}^N D_i \cos \phi_i t, & \tilde{x}_1' &= \sum_{i=1}^N B_i \phi_i \cos \phi_i t - \sum_{i=1}^N D_i \phi_i \sin \phi_i t, \\ \tilde{x}_1'' &= -\sum_{i=1}^N B_i \phi_i^2 \sin \phi_i t - \sum_{i=1}^N D_i \phi_i^2 \cos \phi_i t, & \tilde{x}_1^{(3)} &= -\sum_{i=1}^N B_i \phi_i^3 \cos \phi_i t + \sum_{i=1}^N D_i \phi_i^3 \sin \phi_i t, \\ \tilde{x}_1^{(4)} &= \sum_{i=1}^N B_i \phi_i^4 \sin \phi_i t + \sum_{i=1}^N D_i \phi_i^4 \cos \phi_i t. \end{aligned}$$

Подставим найденные производные от частного решения в уравнение (16):

$$\sum_{i=1}^N B_i \phi_i^4 \sin \phi_i t + \sum_{i=1}^N D_i \phi_i^4 \cos \phi_i t + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2} \sum_{i=1}^N B_i \sin \phi_i t + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2} \sum_{i=1}^N D_i \cos \phi_i t = -\sum_{i=1}^N A_i \phi_i^2 \sin \phi_i t,$$

и выразим из него коэффициенты

$$\begin{cases} B_i = -\frac{A_i \phi_i^2}{\phi_i^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}}, \\ D_i = 0. \end{cases}$$

Теперь мы можем записать эталонный закон движения объекта защиты (рис. 2) для задачи (1)–(4) при полигармонических колебаниях основания:

$$y_i(t) = -\sum_{i=1}^N \frac{A_i \phi_i^2}{\phi_i^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \sin \phi_i t. \quad (17)$$



Найдем выражение, определяющее эталонное управление (рис. 3), соответствующее (17):

$$\ddot{\psi}_2 = -\frac{2x_1}{L^2}, \quad \ddot{\psi}_2 = \frac{2}{L^2} \sum_{i=1}^N \frac{A_i \phi_i^2}{\phi_i^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \sin \phi_i t,$$

$$\dot{\psi}_2 = \frac{2}{L^2} \sum_{i=1}^N \frac{A_i \phi_i^2}{\phi_i^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \int \sin \phi_i t dt = -\frac{2}{L^2} \sum_{i=1}^N \frac{A_i \phi_i^2}{\phi_i^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \cos \phi_i t,$$

$$\psi_2 = -\frac{2}{L^2} \sum_{i=1}^N \frac{A_i \phi_i^2}{\phi_i^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \int \cos \phi_i t = -\frac{2}{L^2} \sum_{i=1}^N \frac{A_i \phi_i^2}{\phi_i^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \sin \phi_i t,$$

$$v^3(t) = -\frac{2}{L^2} \sum_{i=1}^N \frac{A_i \phi_i^2}{\phi_i^2 + \frac{\ell^2}{\gamma^2 L^2}} \frac{\ell^2}{2\gamma^2} \sin \phi_i t = -\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\frac{\gamma^2 L^2}{\ell^2} \phi_i^4 + 1} \sin \phi_i t.$$

$$v^3(t) = -\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\frac{\gamma^2 L^2}{\ell^2} \phi_i^4 + 1} \sin \phi_i t. \quad (18)$$

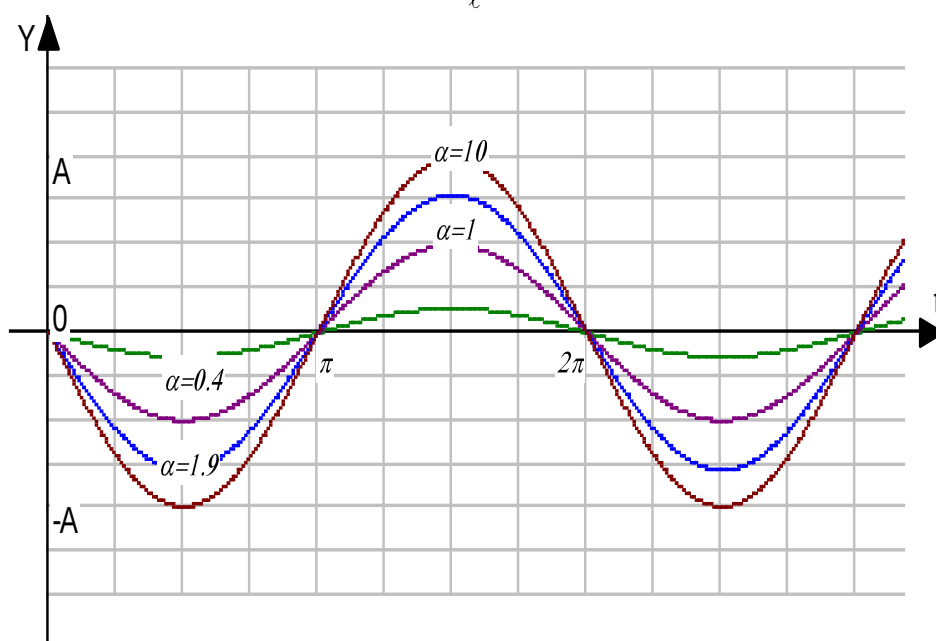


Рис. 2. Эталонный закон движения объекта защиты
Fig. 2. Reference law of motion of the object of protection

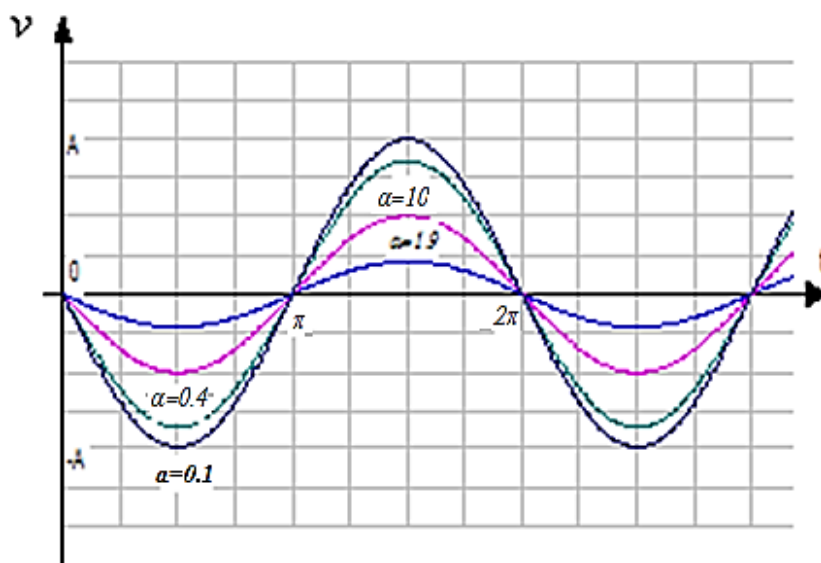


Рис. 3. Эталонное управление для системы с одной степенью свободы
Fig. 3. Reference control for the system with one degree of freedom

Заключение

Таким образом, полученные при гармоническом возмущении зависимости изменения максимального значения смещения и максимального значения амплитуды управления, зависящие от α , позволяют сделать следующий вывод: при оптимальной виброзащитной системе с ростом значения α максимальное смещение возрастает, а максимальное значение функции управления убывает. Тогда соответствующим выбором весового коэффициента α можно добиваться одновременного выполнения требований, накладываемых на качество виброзащиты и ограничения габаритных размеров колесного транспортного средства.

Библиографический список

1. Свирбутович О.А., Городецкий А.М. Анализ деятельности предприятий автомобильного транспорта России в условиях перехода к рыночной экономике // Техничко-экономические проблемы развития регионов: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием ИРНТУ (г. Иркутск, 24–28 апреля 2012 г.). Иркутск, 2012. С. 45–54.
2. Свирбутович О.А., Колчин В.С. Реинжиниринг и модернизация современных предприятий автомобильного транспорта // Вестник ИргТУ. 2015. № 12. С. 269–275.
3. Охрана труда и безопасность жизнедеятельности [Электронный ресурс]. URL: <http://ohrana-bgd.narod.ru> (15.11.2017).
4. Свирбутович О.А., Иванова А.П. Современные тенденции развития автомобильного рынка России // Техничко-экономические проблемы развития регионов: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием ИРНТУ (г. Иркутск, 16–17 ноября 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 137–141.
5. Гриб В.В., Петрова И.М., Романов А.Н. Оценка вероятности отказа механических систем моделирования технического состояния // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 5. С. 55–60.
6. Елтошкина Е.В., Ильин П.И., Шелкунова Н.О. Задача конструирования виброзащитной системы твердого тела // Вестник ИргСХА. 2017. Ч. 1. № 81. С. 102–109.
7. Миждон А.Д., Елтошкина Е.В., Имыхелова М.Б. Оптимизационные задачи теории виброзащитных систем. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. 189 с.
8. Миждон А.Д., Миждон К.А. Об одном подходе к нахождению управления, обеспечивающего выполнение фазовых ограничений в линейной задаче управления // Автоматика и телемеханика. 2015. Т. 76. № 3. С. 193–204.
9. Миждон А.Д., Елтошкина Е.В. Параметрическая оптимизация систем виброзащиты // Идентификация систем и задачи управления: материалы II Междунар. конф. Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, март 2003 г.). Москва, 2003. С. 1880–1886.
10. Миждон А.Д., Елтошкина Е.В. Синтез параметров в САПР ВЗС // «ТиПСиб»: материалы I Всеросс. науч.-техн. конф. Вост.-Сиб. гос. техн. ун-та (г. Улан-Удэ, 1999 г.). Улан-Удэ, 1999. С. 247–252.



References

1. Svirbutovich O.A., Gorodeckij A.M. *Analiz deyatel'nosti predpriyatij avtomobil'nogo transporta Rossii v usloviyah perekhoda k rynochnoj ehkonomie* [Analysis of Russian motor transport enterprise activity in the conditions of transition to market economy]. *Materialy II nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem IRNITU "Tekhniko-ehkonomicheskie problemy razvitiya regionov"* [Materials of the II Scientific and Practical Conference with International Participation at IRNITU "Technical and economic problems of regional development," Irkutsk, 24–28 April 2012], Irkutsk, 2012, pp. 45–54. (In Russian).
2. Svirbutovich O.A., Kolchin V.S. Reengineering and modernization of modern automotive service enterprises. *Vestnik IrSTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 12, pp. 269–275. (In Russian).
3. *Okhrana truda i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Labor protection and life safety]. Available at: <http://ohrana-bgd.narod.ru> (accessed 15 November 2017)
4. Svirbutovich O.A., Ivanova A.P. *Sovremennye tendencii razvitiya avtomobil'nogo rynka Rossii* [Modern development trends of the automotive market in Russia]. *Materialy II nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem IRNITU "Tekhniko-ehkonomicheskie problemy razvitiya regionov"* [Materials of the II Scientific and Practical Conference with International Participation at IRNITU "Technical and economic problems of regional development," Irkutsk, 16–17 November 2015]. Irkutsk, 2015, pp. 137–141. (In Russian).
5. Grib V.V., Petrova I.M., Romanov A.N. Estimation of the probability of mechanical systems breakdown by technical state modeling. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2016, no. 5, pp. 55–60. (In Russian).
6. Eltoshkina E.V., Il'in P.I., Shelkunova N.O. The problem of construction of the vibration protection system of the solid body. *Vestnik Irkutskoj gosudarstvennoj sel'skhozajstvennoj akademii* [Vestnik IrGSHA], 2017, vol. 1, no. 12, pp. 269–275. (In Russian).
7. Mizhidon A.D., Eltoshkina E.V., Imyhelova M.B. *Optimizacionnye zadachi teorii vibrozashchitnyh sistem: monografiya* [Optimization problems of the theory of vibration protection systems: Monograph]. Ulan-Ude, Publishing House of the State Technical University, 2015, 189 p. (In Russian).
8. Mizhidon A.D., Mizhidon K.A. On an approach to determination of control capable to satisfy the phase constraints in linear problem of control. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control], 2015, vol. 76, no. 12, pp. 193–204. (In Russian).
9. Mizhidon A.D., Eltoshkina E.V. *Parametricheskaya optimizatsiya sistem vibrozashchity* [Parametric optimization of vibration protection systems]. *Materialy II Mezhdunarodnoy konferentsii Instituta problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya"* [Materials of II International Conference of V.A. Trapeznikov Institute of Control Problems RAS "System Identification and Control Problems" Moscow, March 2003]. Moscow, 2003, pp. 1880–1886. (In Russian).
10. Mizhidon A.D., Eltoshkina E.V. *Sintez parametrov v SAPR VZS* [Parameter synthesis in the CAD intake structure]. *Materialy I Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «TiPSib»* [Materials the 1st All-Russian Scientific and Technical Conference of the East Siberian State Technical University «TiPSib»]. Ulan-Ude, 1999. pp. 247–252. (In Russian).

Критерии авторства

Свирбутович О.А., Елтошкина Е.В., Ильин П.И. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Svirbutovich O.A., Eltoshkina E.V., Ilyin P.I. 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.

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: vestnik@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), представлен 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
№ 2 (133) 2018

Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Т.В. Сокольников
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 27.02.2018 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 30,5.
Тираж 500 экз. Заказ 61. Поз. плана 3н.

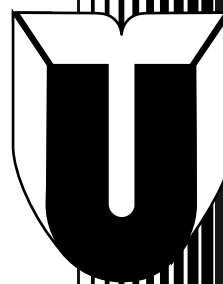
Издание распространяется **бесплатно**

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

